

ESTUDIO PARAMÉTRICO SOBRE MALLAS DE DOBLE CAPA

TUTOR: PÉREZ VALCÁRCEL, JUAN BAUTISTA
CURSO: 2015/2016

VILLAR MONTEAGUDO, IVÁN

TÍTULO:

ESTUDIO PARAMÉTRICO SOBRE MALLAS DE DOBLE CAPA

DATOS SIGNIFICATIVOS:

NOMBRE Y APELLIDOS: IVÁN VILLAR MONTEAGUDO

DNI: 53.119.486-C

REFERENCIA TFG: ALU-06

CURSO ACADÉMICO: 2015/2016

FECHA DE ENTREGA: 13/11/2015

RESUMEN:

Aunque el diseño de estructuras en edificación es un problema complejo, su núcleo orbita alrededor de la optimización: lograr el mejor desempeño estructural con la menor cantidad de material. Este proceso, dadas las múltiples variaciones que pueden darse a partir del mismo sistema, podría alargarse indefinidamente. A través del diseño paramétrico, introduciendo una serie de valores, somos capaces de obtener más rápido un modelo estructural optimizado.

Este estudio busca diseñar una estructura espacial para una cubierta de pista deportiva de 30x60 metros, con tres tipos de malla de doble capa: plana, cilíndrica y vaída, a resolver con tres posibles módulos: 3x3, 4x4 y 5x5 metros.

El proceso consistirá, primero, en la creación del modelo virtual con el plugin Grasshopper de Rhinoceros. Después, exportaremos el modelo al programa de cálculo CYPE, donde tomaremos los datos de peso y deformación con los que deduciremos cuál de los sistemas optimiza mejor el material.

Palabras clave: parametrización, modulación, optimización, peso, deformación.

RESUMO

A pesares de que o deseño estrutural en edificación é un problema complexo, o seu núcleo orbita arredor da optimización: lograr o mellor desempeño estrutural coa menor cantidade de material. Este proceso, dadas as múltiples variacións que se poden dar a partir do mesmo sistema, pode alongarse indefinidamente. A través do deseño paramétrico, introducindo unha serie de valores, somos capaces de obter máis rápido un modelo estrutural optimizado.

Este estudio busca deseñar unha estrutura espacial para unha cuberta de pista deportiva de 30x60 metros, con tres tipos de malla de dobre capa: plana, cilíndrica e vaída, a resolveres con tres posíbeis módulos: 3x3, 4x4 e 5x5 metros.

O proceso consistirá, primeiro, na creación do modelo virtual co plugin Grasshopper de Rhinoceros. Despois, exportaremos o modelo ao programa de cálculo CYPE, onde tomaremos os datos de peso e deformación cos que deduciremos cal dos sistemas optimiza mellor o material.

Palabras chave: parametrización, modulación, optimización, peso, deformación.

ABSTRACT

Although building structural design is a complex problem, its core consists in optimization: to achieve the best structural performance with the less material amount. Because of the multiple variations the same structural system can offer, this process could last an indefinite amount of time. Through parametric design, we are able to obtain an optimized structural model in a much shorter time.

In this study we will design a spatial structure for the roofing of a 30x60 meters sports court, with three types of double layered mesh: flat, cylindrical and sail-vaulted, to be solved whether with 3x3, 4x4 or 5x5 meters modules.

The process consists in the creation of the virtual model with the Grasshopper plugin for Rhinoceros, and therefore exporting the model to the calculation software CYPE. Taking its weight and deformation data, we will deduce which of them better optimizes the material.

Keywords: parametrization, modulation, optimization, weight, deformation.

ÍNDICE

PÁG.

A) LAS MALLAS ESPACIALES EN LA ARQUITECTURA

A1: INTRODUCCIÓN.....	6
A2: DESCRIPCIÓN Y CARACTERÍSTICAS.....	6
A3: TIPOLOGÍAS.....	7

B) INTRODUCCIÓN EN GRASSHOPPER

B1: ELABORACIÓN DEL MODELO SOBRE LA MALLA PLANA.....	8
B1.1: MALLA PLANA DE 3X3	
B1.2: MALLA PLANA DE 4X4	
B1.3: MALLA PLANA DE 5X5	
B2: ELABORACIÓN DEL MODELO SOBRE LA MALLA CILÍNDRICA.....	13
B2.1: MALLA CILÍNDRICA DE 3X3	
B2.2: MALLA CILÍNDRICA DE 4X4	
B2.3: MALLA CILÍNDRICA DE 5X5	
B3: ELABORACIÓN DEL MODELO SOBRE LA MALLA VAÍDA.....	15
B3.1: MALLA VAÍDA DE 3X3	
B3.2: MALLA VAÍDA DE 4X4	
B3.3: MALLA VAÍDA DE 5X5	

C) EXPORTACIÓN A PROGRAMA DE CÁLCULO: CYPE 2015

C0: DATOS GENERALES

C0.1: MEMORIA DESCRIPTIVA.....	17
C0.2: MODELOS DE CÁLCULO EMPLEADOS.....	17
C0.3: ESTIMACIÓN DE ACCIONES.....	17

C1: CÁLCULO Y ANÁLISIS DE LA MALLA PLANA

C1.1: MALLA PLANA DE 3X3.....	18
C1.2: MALLA PLANA DE 4X4.....	22
C1.3: MALLA PLANA DE 5X5.....	26
C1.4: COMPARACIÓN ENTRE LAS MALLAS PLANAS.....	30

C2: CÁLCULO Y ANÁLISIS DE LA MALLA CILÍNDRICA

C2.1: MALLA CILÍNDRICA DE 3X3.....	31
C2.2: MALLA CILÍNDRICA DE 4X4.....	35
C2.3: MALLA CILÍNDRICA DE 5X5.....	39
C2.4: COMPARACIÓN ENTRE LAS MALLAS CILÍNDRICAS.....	43

C3: CÁLCULO Y ANÁLISIS DE LA MALLA VAÍDA

C3.1: MALLA VAÍDA DE 3X3.....	44
C3.2: MALLA VAÍDA DE 4X4.....	49
C3.3: MALLA VAÍDA DE 5X5.....	53
C3.4: COMPARACIÓN ENTRE LAS MALLAS VAÍDA.....	57

D) CONCLUSIÓN GLOBAL ANALÍTICA Y DESCRIPTIVA.....58

E) ÍNDICE FOTOGRÁFICO.....59

F) BIBLIOGRAFÍA.....62

A) LAS MALLAS ESPACIALES EN LA ARQUITECTURA

A1: INTRODUCCIÓN

El empleo de las estructuras espaciales en la construcción ha experimentado un gran desarrollo durante las últimas décadas. Entre las causas que lo han propiciado cabría destacar el hecho de que están concebidas para conseguir un alto grado de prefabricación, aspecto que ha llevado a alcanzar grandes ahorros de mano de obra tanto en fabricación como en montaje. A este hecho hay que añadirle el gran avance en cuanto a programas informáticos de cálculo estructural que ha permitido un análisis rápido y preciso de estas estructuras favoreciendo su competitividad.

Las mallas espaciales, desde un punto de vista estructural y constructivo, derivan de la extensión del principio de triangulación de las celosías planas al espacio. Este paso se produce a finales del siglo XIX y está presente en dos grandes obras arquitectónicas como son la Torre Eiffel en París (1889) y en el Forth Railway Bridge en Edimburgo (1890).



•Figura 01.



•Figura 02.

Históricamente podemos remontarnos a Alexander Graham Bell como gran contribuyente del desarrollo de las mallas espaciales ya que, hacia 1900, trabajaba con formas tetraédricas para conseguir la mayor resistencia con el menor peso, aplicado al ámbito de la ingeniería aeronáutica. Un ejemplo de su trabajo es su aparato volador de planta circular, constituido por una malla de tetraedros.

Sin embargo, el gran pionero en el diseño de mallas espaciales en el ámbito arquitectónico fue el estadounidense Buckminster Fuller (1895-1981). Cabe destacar en sus proyectos su investigación sobre la generación de poliedros a partir del macizado del espacio con esferas y sobre la triangulación geodésica de la superficie esférica.



•Figura 03.



•Figura 04.

La idea de producción en masa no empezó hasta los años cuarenta en Alemania con M. Mengerhausen (nudo Mero) y en Norte América con A.E. Fentiman (sistema Triodético) y C.W. Atwood (sistema Unistrut). Otros arquitectos e ingenieros que contribuyeron a su desarrollo después de la Segunda Guerra Mundial fueron Friedman, Duchateau, Lederer, Makowski o Le Ricolais, aunque la utilización consciente de las ventajas estructurales que se obtienen al combinar módulos triangulares es reciente.

Hoy en día, las mallas espaciales, por su ligereza y facilidad de construcción se utilizan para cubrir grandes espacios sin necesidad de apoyos intermedios apareciendo en cubiertas de grandes recintos de carácter lúdico o festivo.

A2: DESCRIPCIÓN Y CARACTERÍSTICAS

Las celosías tridimensionales o más conocidas como mallas espaciales se caracterizan por estar formadas a base de elementos muy simples; barras y nudos. De esta manera los diferentes tipos de uniones entre estos dos elementos constituyen el conjunto estructural. La distribución geométrica de barras se consigue con la repetición y yuxtaposición de poliedros sencillos correspondiéndose los nudos con sus vértices y las barras con las aristas.

En los casos más frecuentes, el conjunto estructural está comprendido entre dos superficies envolventes, simplemente paralelas, planas o no, que se denominan capas de la malla. Normalmente cada capa suele estar formada por una red de barras dispuestas en forma de retícula.

Los nudos de cada capa se conectan con los de la opuesta mediante otras barras denominadas normalmente diagonales.

El trabajo realizado por el conjunto estructural y el reparto de los esfuerzos en varias direcciones principales hace que las tensiones máximas obtenidas sean normalmente muy inferiores a los que se producirían en una estructura equivalente constituida por celosías planas. De aquí se deduce una de las características propias de las mallas espaciales que es su capacidad para cubrir grandes luces sin necesidad de apoyos intermedios. Además, como las barras sólo trabajan a compresión o tracción, no se necesitan perfiles de gran sección para soportar el momento flector por lo que nos encontramos con estructuras en el que su peso propio es inferior al de las convencionales.

Otra característica a tener en cuenta es la rigidez conjunta de la estructura. La malla espacial se comporta como un entramado sólido prácticamente indeformable consiguiendo grandes ventajas frente a las estructuras convencionales. En primer lugar permite una conexión bastante flexible con los apoyos en cuanto a número y posición. Además, el hecho de que la cubierta se comporte como una placa uniendo los apoyos sobre los que descansa, hace que todos ellos trabajen conjuntamente cuando la estructura esté sometida a acciones exteriores horizontales como pueden ser la fuerza del viento o esfuerzos sísmicos.

Pero no nos debemos olvidar que el óptimo aprovechamiento de este tipo de estructuras se consigue con un buen diseño estructural. De este modo, la curvatura y forma de la superficie que conforma la malla así como su tipo y número de apoyos son factores claves a la hora de conseguir la mejor optimización.

A3- TIPOLOGÍAS

Las mallas espaciales pueden clasificarse en dos grandes grupos en función del número de capas que las forman:

1- Mallas formadas por una capa:

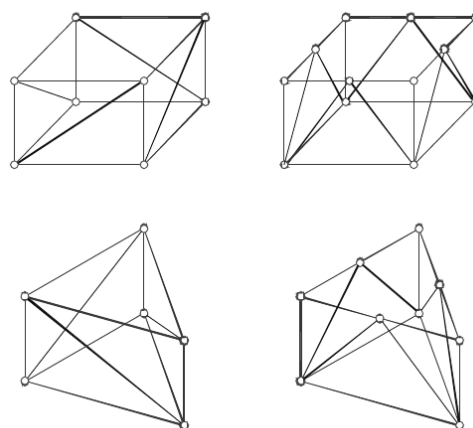
Estas mallas obtienen su resistencia a través de su geometría espacial, por lo que suelen estar plegadas o curvadas. Con una sola curvatura suelen formar bóvedas y con dos curvaturas superficies sincásticas (cúpulas) o anticlásticas (paraboloides).

2- Mallas formadas por dos o más capas:

Se generan conectando dos mallas planas paralelas mediante elementos situados en planos verticales o bien a través de poliedros formados al unir dos emparrillados mediante diagonales. Estas mallas pueden ser de dos tipos:

2.1- Reticulados polimétricos:

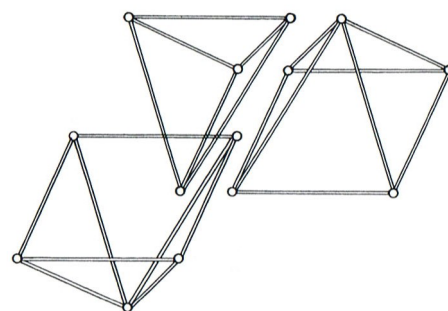
Se trata de mallas espaciales coplanarias compuestas por prismas triangulares, rectangulares o hexagonales arriostradas por barras diagonales que conectan nudos con nudos o nudos con el punto medio de la barra. De esta manera se obtienen barras de distintas longitudes.



•Figura 05.

2.2- Reticulados isométricos:

Son mallas espaciales coplanarias compuestas por tetraedros y semioctaedros. Son capas iguales pero compensadas entre sí (por ejemplo, cuadrado sobre cuadrado por traslación oblicua).



•Figura 06.

B) INTRODUCCIÓN EN GRASSHOPPER

B1: ELABORACIÓN DEL MODELO SOBRE LA MALLA PLANA

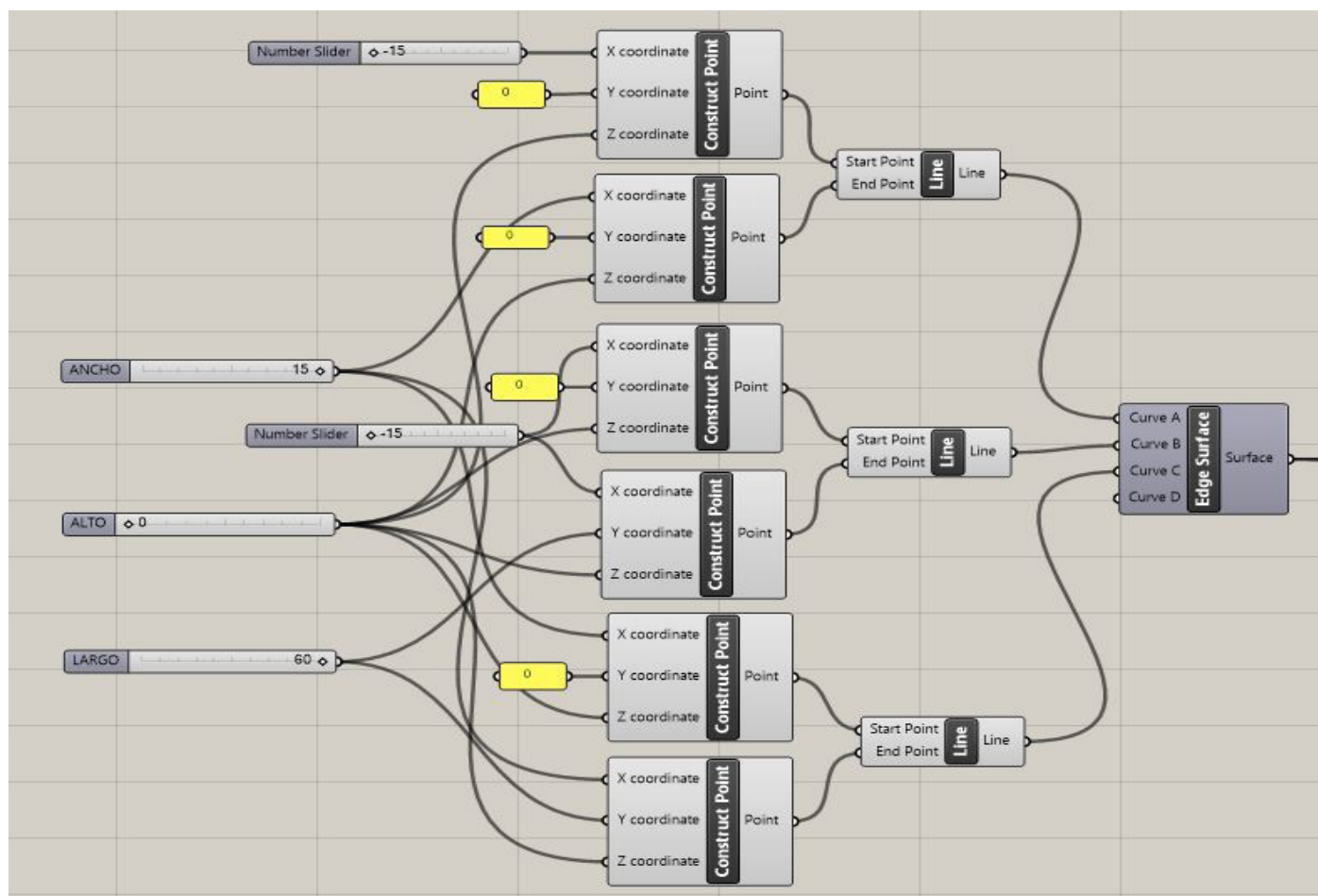
Este trabajo pretende abordar un estudio estructural de mallas de doble capa a través de herramientas de diseño paramétrico, dejando atrás otros programas utilizados hasta el momento. La base del diseño paramétrico es la generación de geometría a partir de la definición de una familia de parámetros iniciales y la programación de las relaciones formales que guardan entre ellos. Consiste en la utilización de variables y algoritmos para generar un árbol de relaciones matemáticas y geométricas que permitan no sólo llegar a un diseño, sino generar todo el rango de posibles soluciones que la variabilidad de los parámetros iniciales nos permitan. Podemos resumir el diseño paramétrico en:

-Diseñar un proceso y no un resultado concreto: Al diseñar un proceso desarrollamos una colección de relaciones matemáticas y geométricas creando procesos y sistemas, los cuales nos permiten explorar más de un resultado, con ciertas premisas de diseño establecidas previamente.

- Posibilidad de relacionar variables o parámetros: Teniendo un proceso de diseño y no una forma preestablecida se pueden manipular sus variables y propiedades, las cuales podemos modificar en tiempo real y así comparar resultados, con la finalidad de tener un resultado más eficiente.

En el ámbito estructural, esto quiere decir que una vez decidida la estructura base se puede ir poco a poco transformándola para encontrar posibles mejoras o fallos en su funcionamiento y así poder comparar esta estructura inicial con la final para conseguir el diseño más efectivo. Todo ello asociado a un gran ahorro de tiempo al no tener que andar redibujando una y otra vez para conseguir los resultados deseados sino que solamente cambiando el valor de los parámetros el programa lo hará él solo.

El programa paramétrico que he elegido es **Grasshopper**, un plug-in del programa Rhinoceros. Será el programa con el que elaboraré los tres tipos de modelos estructurales (plana, cilíndrica y vahida) para su posterior análisis. Partiendo siempre del requisito de cubrir una superficie de 30x60m como puede ser un recinto polideportivo empezaremos el estudio introduciendo el caso de la **malla espacial plana de doble capa** en Grasshopper.



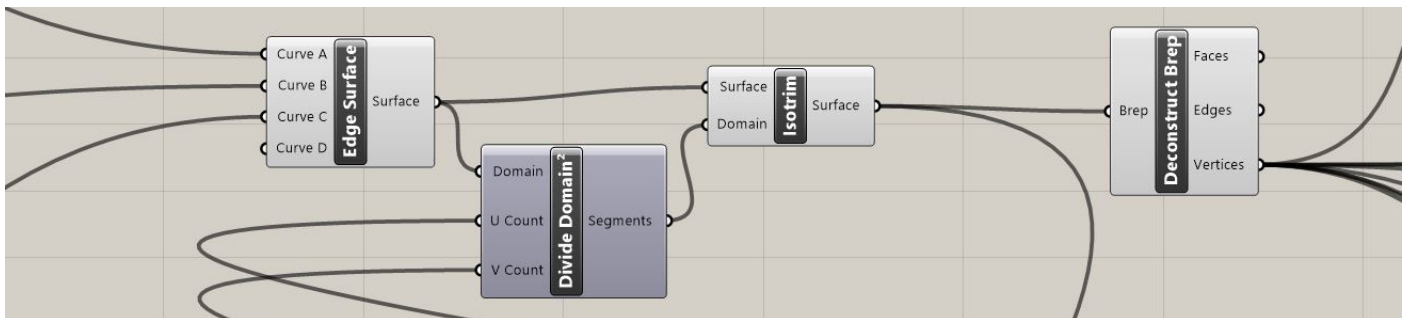
PASO 1

•Figura 07.

Como muestra la figura anterior, en primer lugar tenemos que crear una superficie de 30x60m a partir, en este caso, de tres rectas (comando *Line*). Cada una de estas rectas las elaboraremos a partir de dos puntos mediante el comando *Construct Point*. Para construir estos puntos necesitamos sus coordenadas X,Y,Z. Como queremos que estas rectas se muevan para poder modificar la superficie a cubrir emplearemos un *Panel* con datos fijos para aquello que no queramos que se mueva (coordenadas Y de algunas puntos) y un *Slider* para aquello que deseemos que sea manipulable (la distancia entre las rectas).

Una vez tengamos las tres rectas con los parámetros manipulables deseados emplearemos el comando *Edge Surface* para crear la superficie.

El segundo paso es dividir la superficie mediante dominios utilizando los comandos *Isotrim* para evaluar el dominio y *Divide Domain²* para dividirlo. Se une la superficie a "Surface" y el panel *Divide Domain²* a "Domain". *Divide Domain²* se conformará mediante un dominio que será la propia superficie y las divisiones en ambas direcciones que serán determinadas por *Sliders*.



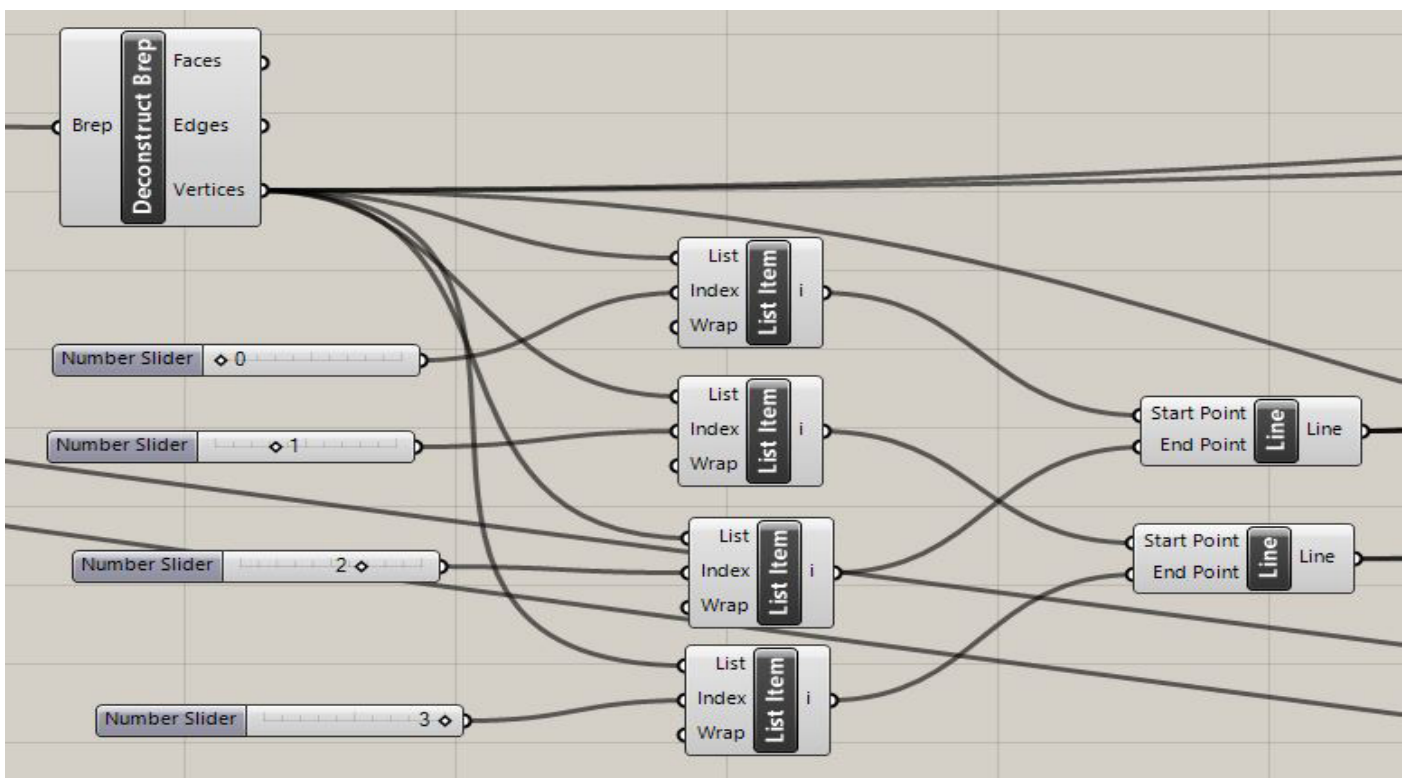
PASO 2

•Figura 08.

La herramienta *Deconstruct Brep* la usaremos para reconocer los puntos de intersección de las divisiones de la superficie realizadas anteriormente. Del apartado "Vértices" de esta herramienta lo unimos a "List" de la herramienta *List Item* gracias a la cual (repitiendo el proceso 3 veces más) se conseguirán dichos puntos. En el apartado "Index" de cada una de las *List Item* colocaremos un *Slider*

correspondiendo en cada caso, de arriba a abajo, los números 0, 1, 2, 3. De esta manera, conseguimos realizar las diagonales y rectas en la superficie.

Haciendo una combinatoria de los puntos resultantes con la herramienta *Line* (entre dos puntos), aplicada dos veces, conseguimos unir todos los puntos que conforman la superficie.

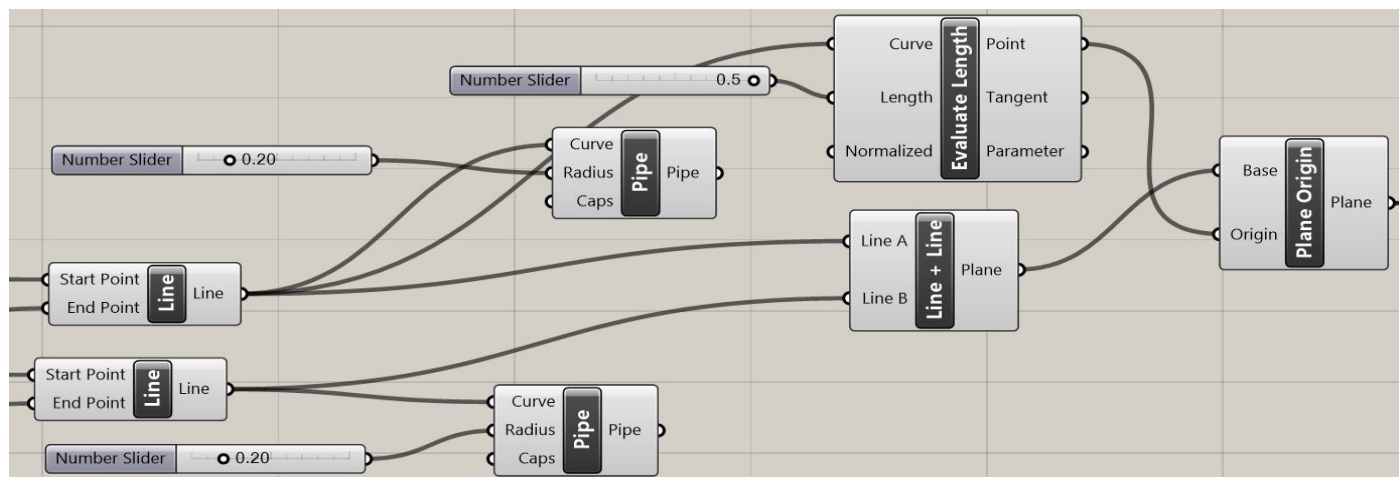


PASO 2

•Figura 09.

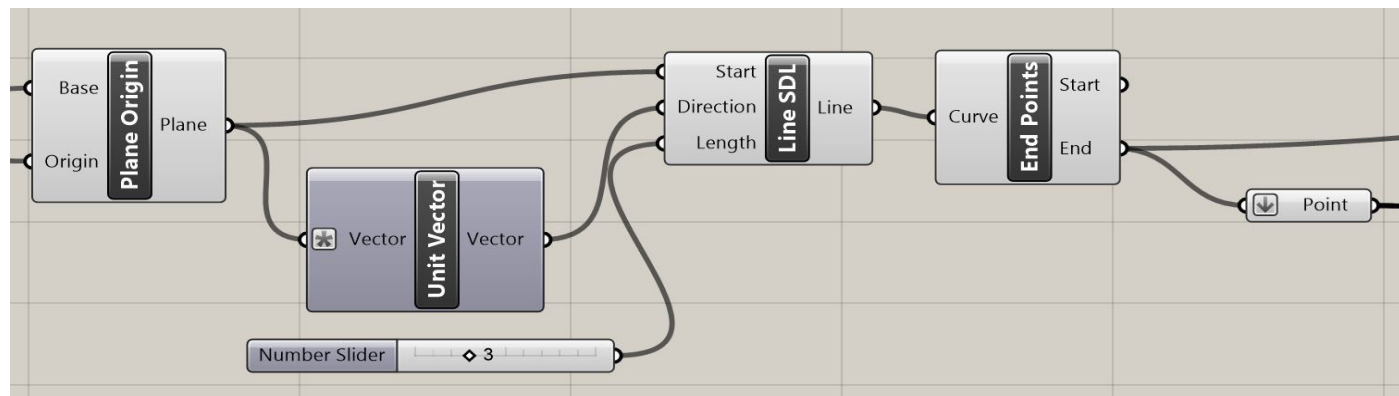
A continuación usamos la herramienta *Line+Line* para crear el plano sobre el que se colocarán perpendicularmente dichos puntos. A continuación se une “Plane” de dicha herramienta con “Base” de la herramienta *Plane Origin* y el punto “Origin” con “Point” de la herramienta *Evaluate Length*, ya citada antes. La traslación perpendi-

cular a dicho plano se produce con la herramienta *Line SDL* dándole la dirección con la herramienta *Unit Vector* y la altura respecto de la superficie base con un *Slider*. Finalmente se sacarán los puntos de dicha línea mediante la herramienta *End Points*. Para conectar los puntos mediante polilíneas usaremos la herramienta *Sub List*,



PASO 3

•Figura 10.



PASO 3

•Figura 11.

conectando así esta herramienta con los puntos creados recientemente y con un dominio que definiremos con un comienzo y un final. El comienzo del dominio será una serie cuyo “Step” corresponderá al *Slider* usado en la dirección V (*V Count*) en la herramienta *Divide Domain*², y “Count” corresponderá al *Slider* usado en la dirección U (*U Count*) en la misma herramienta. El valor de estos dos *Slider* nos definirá la división de la malla en las dos direcciones (**módulos de 3x3, 4x4 y 5x5**).

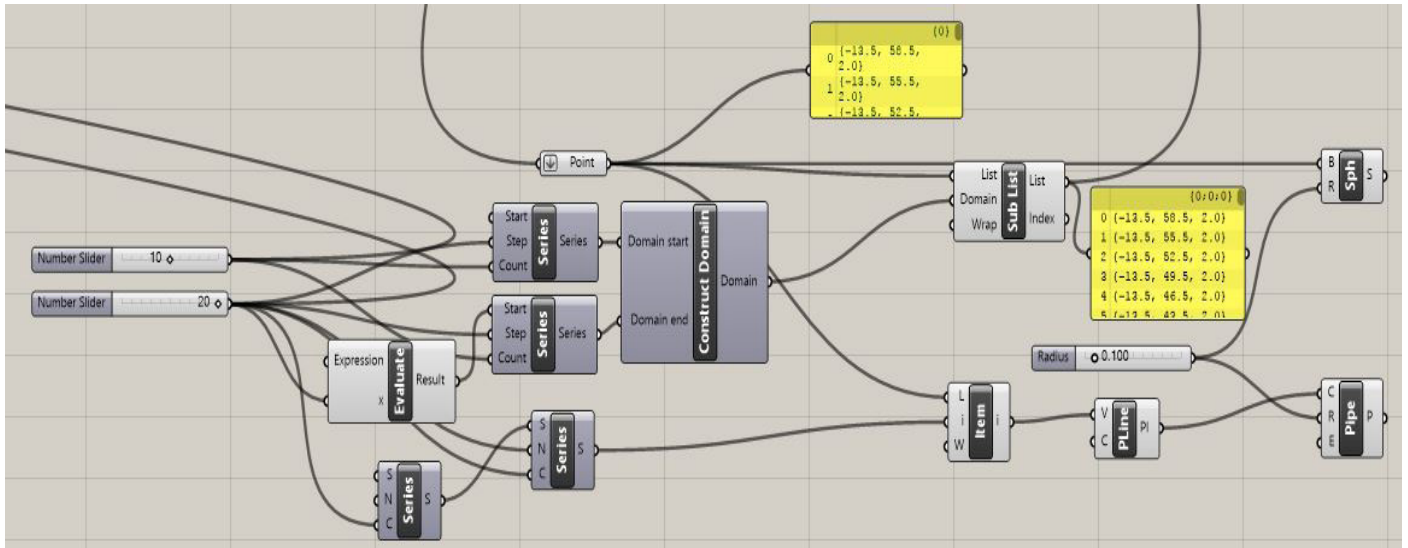
El final del dominio se hará de la misma forma pero aña-

diendo a “Start” una fórmula variable con la herramienta *Evaluate* cuya expresión será $X-1$ y la variable de X se fijará con el *Slider* que se une con el “V Count”. Este proceso nos servirá para crear la lista de la que sacaremos los puntos para poder unir y formar la parte superior de la cercha. Estos puntos se unen con la herramienta *PolyLine*. El resultado es la unión de los puntos superiores únicamente en una dirección uniendo los puntos que pertenezcan a la misma curva de la superficie.

Para crear las uniones mediante polilíneas en la otra di-

rección, creamos una lista mediante la herramienta *List Item*. Primero unimos "List" con los puntos superiores y después necesitamos crear la serie que debe seguir para unir los puntos correctamente. Para ello volvemos a usar la herramienta *Series* donde tanto "Step" como "Count" están unidos al *Slider* usado en la dirección V (*V Count*).

Tal cual está ahora solamente se unen los puntos que se encuentran en una de las caras y al exterior. Para unir los otros puntos necesitamos otra serie que se unirá a "Start". El valor de "Count" será el *Slider* usado en la dirección V (*V Count*) para que los puntos correspondan a la dirección que no se tomó antes.



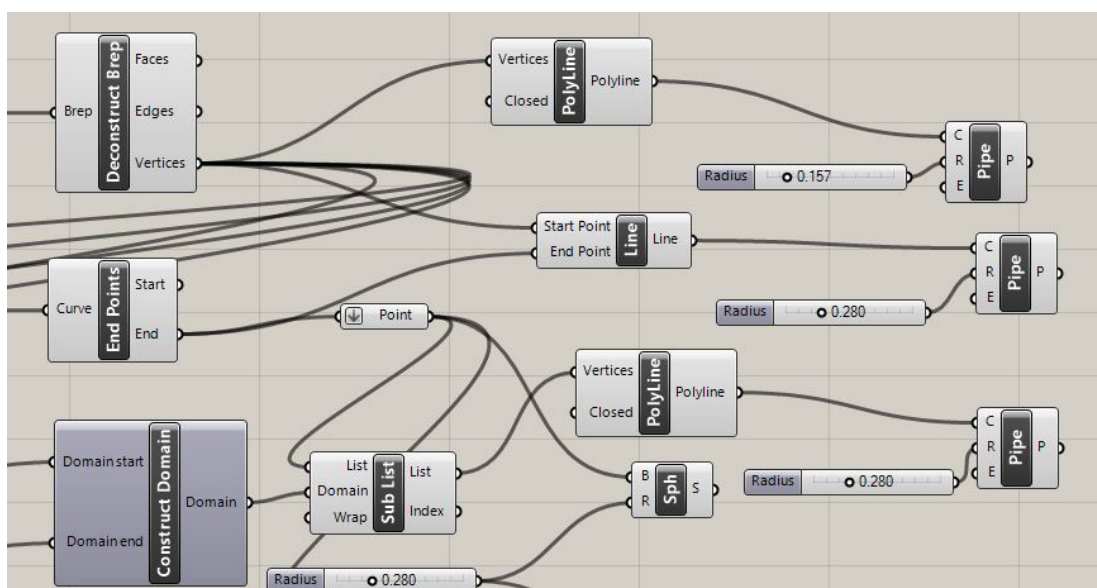
PASO 4

•Figura 12.

Falta por crear las polilíneas que unan todos los puntos inferiores entre si y los superiores con los inferiores. Para ello regresamos a la herramienta *Deconstruct Brep* que se unirá a la herramienta *PolyLine* mediante "Vertices". Se forma así la cuadrícula de la superficie inferior. Las conexiones entre los puntos de las dos alturas lo haremos mediante la herramienta *Line* (entre dos puntos) donde el punto de origen ("Start Point") corresponderá a los puntos creados con el *Deconstruct Brep* ("Vertices")

y el punto final ("End Point") a los puntos finales creados como final de la línea que marcaba la perpendicular al plano de origen (herramienta *End Points*) siendo "Curve" la propia línea. A continuación se le dará el radio deseado con un *Slider* para que pueda ser modificado en cualquier momento.

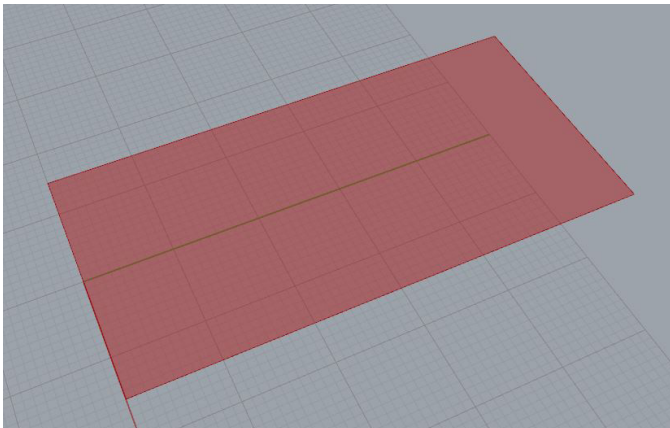
Los puntos también se pueden convertir en rótulas mediante la herramienta *Sphere* dándole un radio para que se produzca la extrusión.



PASOS 5-6

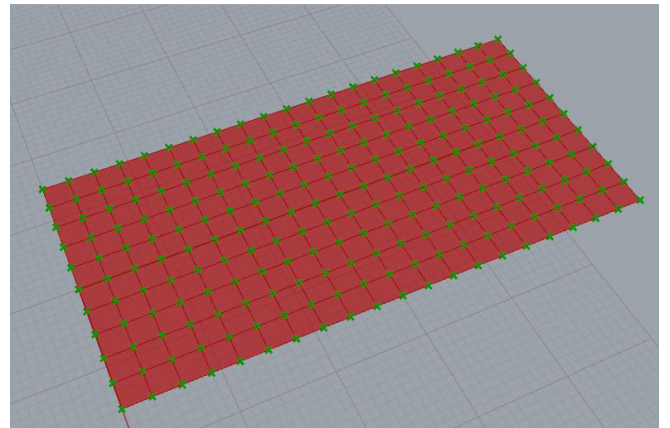
•Figura 13.

RESUMEN PASOS EN GRASSHOPPER



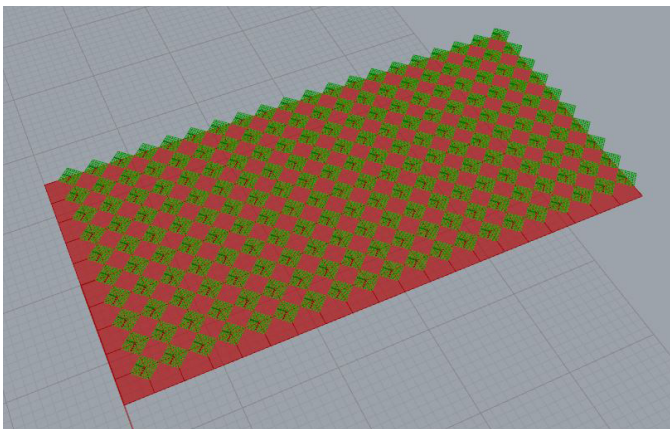
PASO 1

•Figura 14.



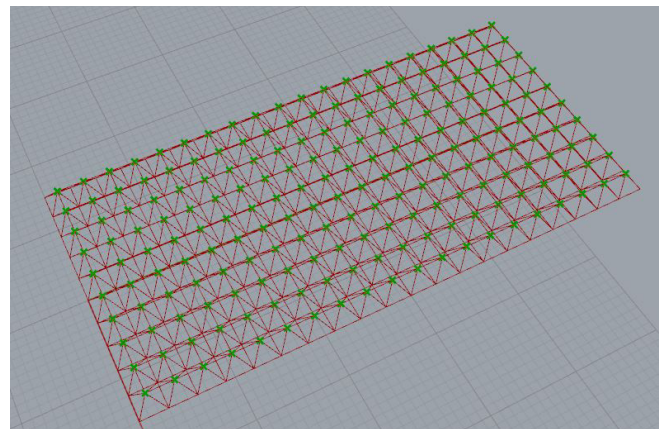
PASO 2

•Figura 15.



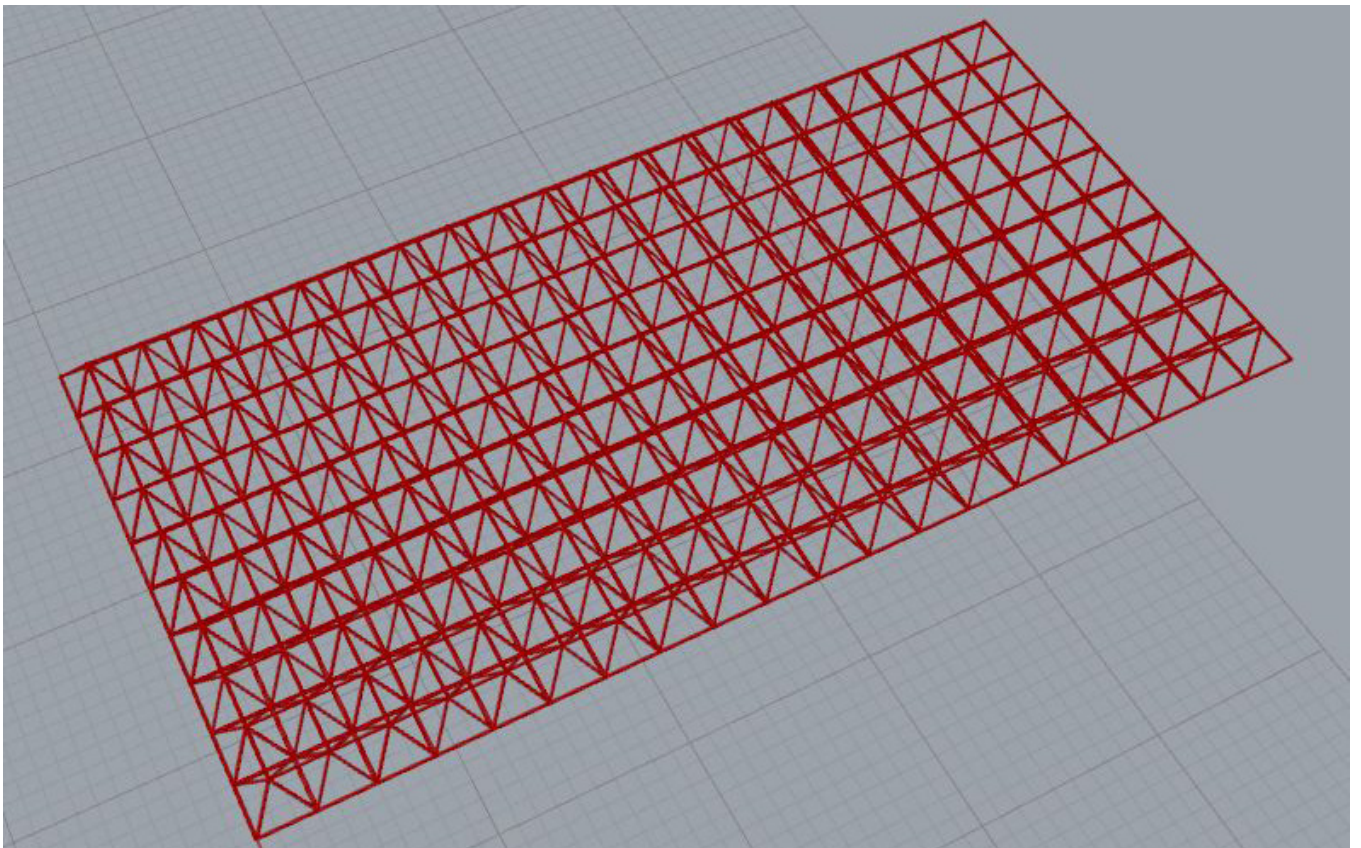
PASO 3

•Figura 16.



PASO 4

•Figura 17.



PASOS 5-6

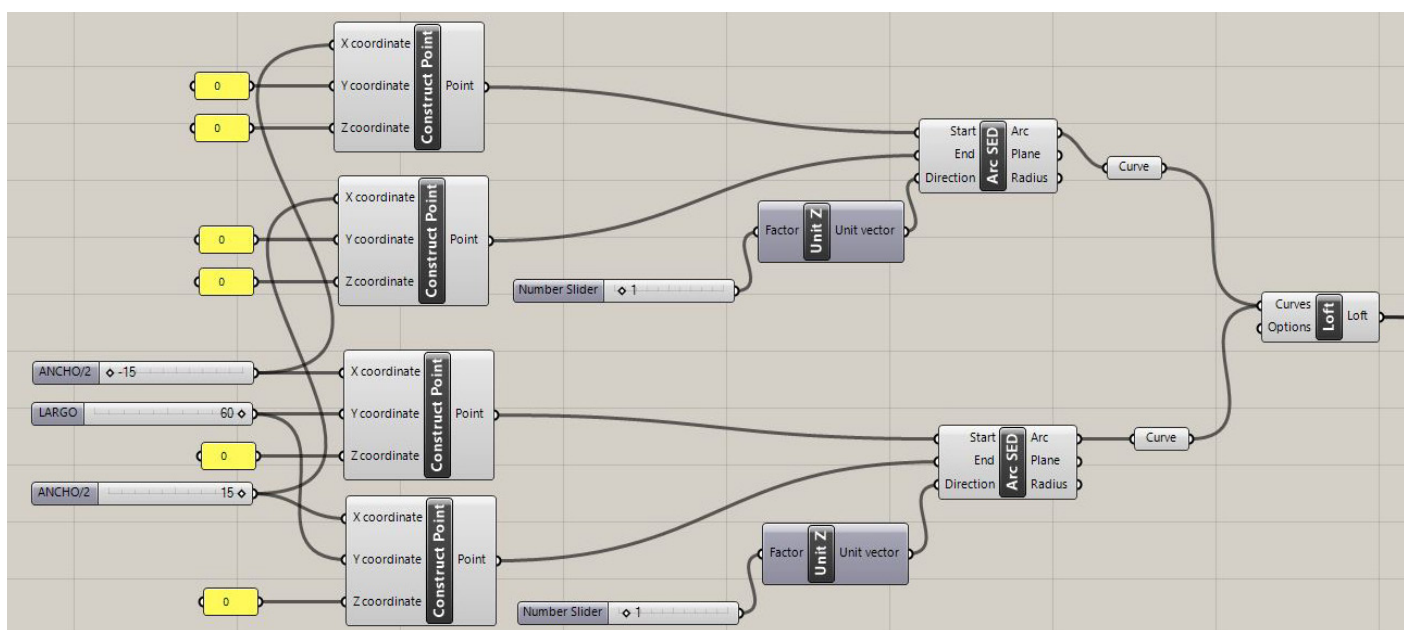
•Figura 18.

B1: ELABORACIÓN DEL MODELO SOBRE LA MALLA CILÍNDRICA

Para la elaboración de la malla cilíndrica de doble capa empezaremos creando una superficie cilíndrica. El proceso de elaboración de esta superficie será lo único diferente respecto a todo el proceso anterior sobre la malla plana.

En este caso, crearemos la superficie mediante dos semicircunferencias construidas a través de un punto inicial y

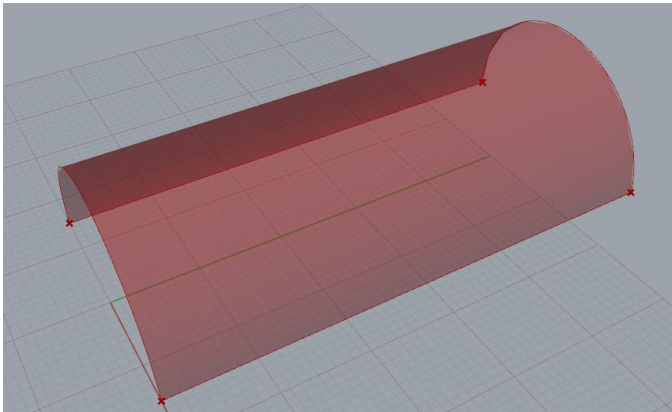
otro final mediante sus coordenadas X, Y, Z. Sus coordenadas X e Y serán manipulables mediante un *Slider* de tal manera que se podrá variar el ancho y la separación de las dos semicircunferencias dando lugar a una superficie variable. Una vez obtenido ambas circunferencias las convertiremos en curvas mediante el comando *Curve* y crearemos la superficie que la conforma con el comando *Loft*. A partir de aquí se seguirá el mismo proceso que utilizamos para elaborar la malla plana.



PASO 1

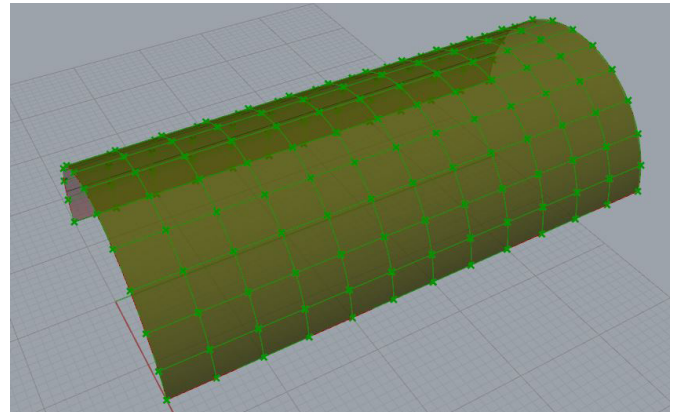
•Figura 19.

RESUMEN PASOS EN GRASSHOPPER



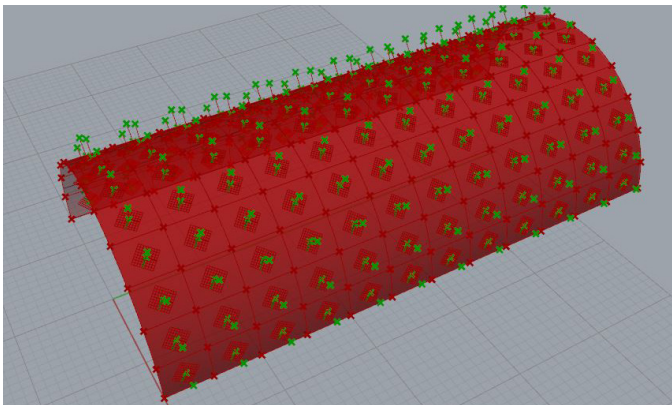
PASO 1

•Figura 20.



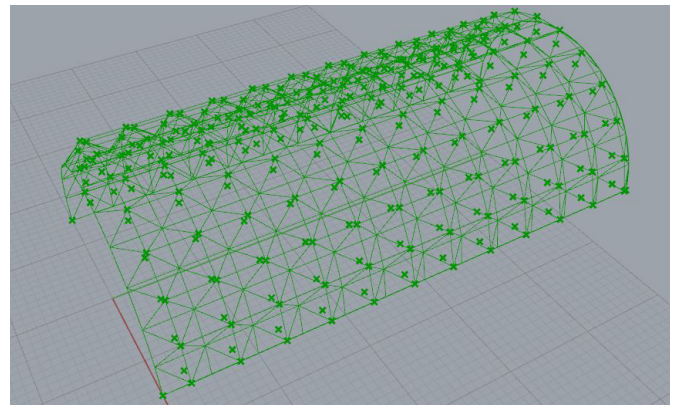
PASO 2

•Figura 21.



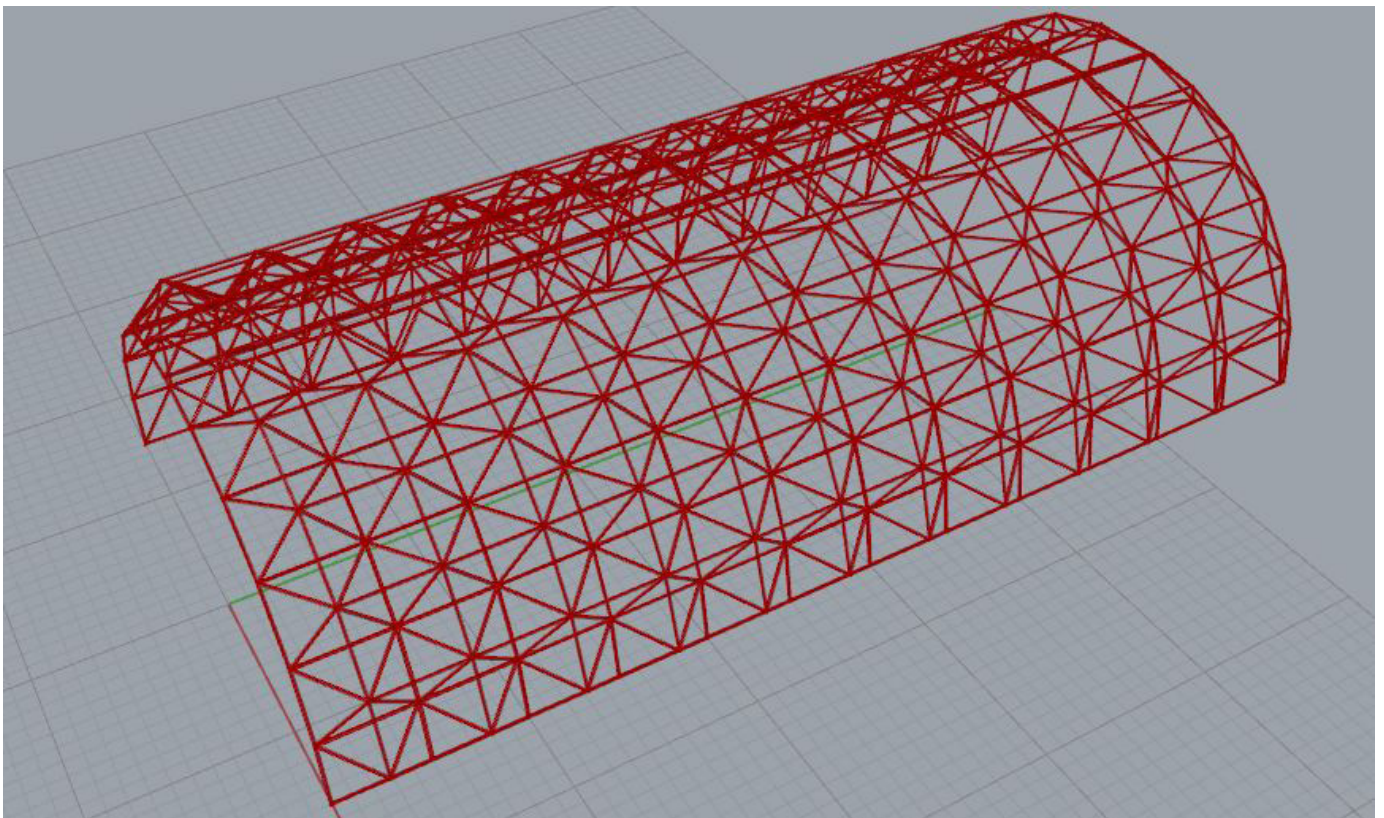
PASO 3

•Figura 22.



PASO 4

•Figura 23.



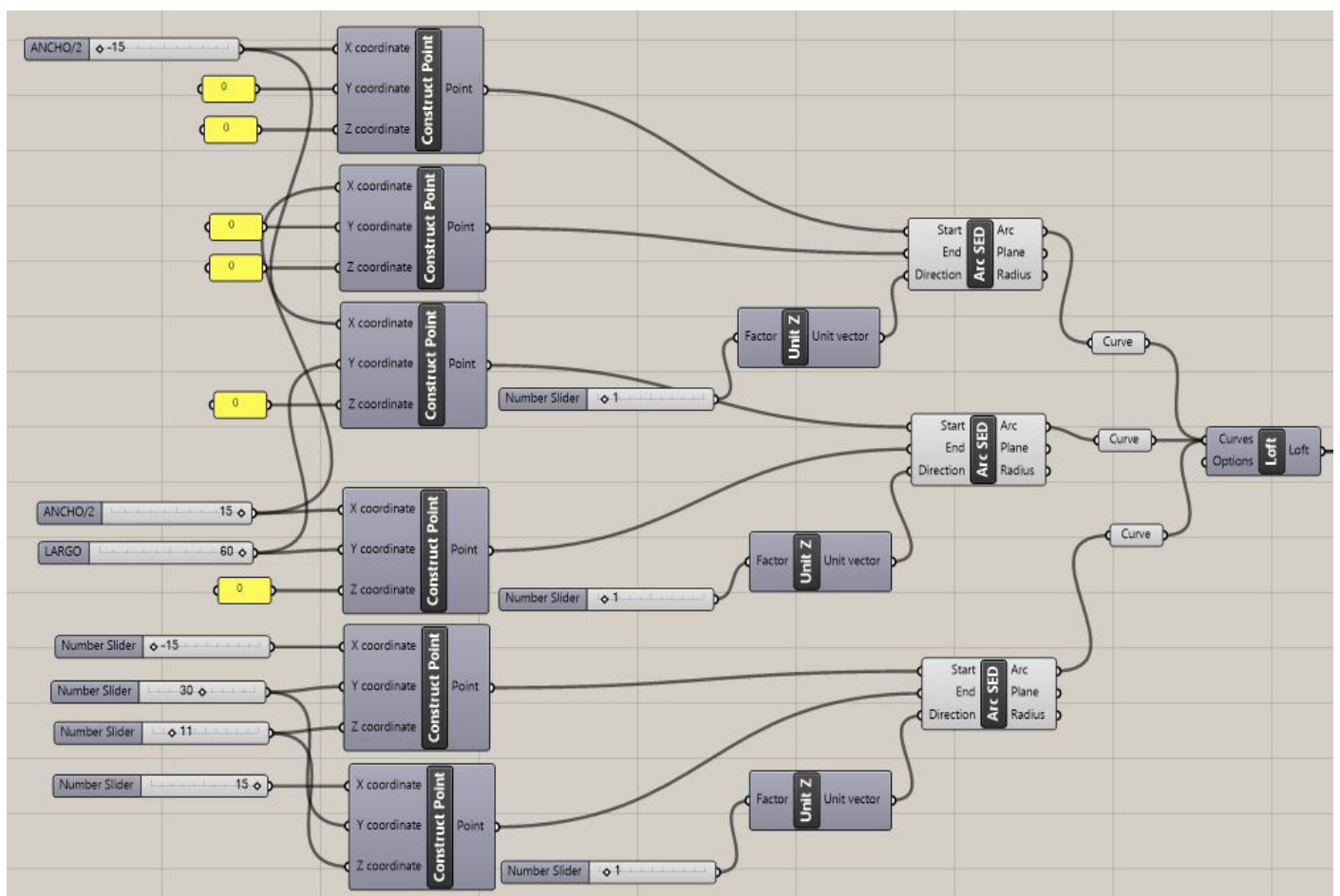
PASOS 5-6

•Figura 24.

B1: ELABORACIÓN DEL MODELO SOBRE LA MALLA VAÍDA

La malla vaída de doble capa la crearemos a partir de la elaboración de una superficie de doble curvatura conocida como paraboloides hiperbólico. De igual modo que la malla anterior, en este proceso lo único diferente es el modo y la elaboración de la superficie de doble curvatura. En este caso, crearemos la superficie mediante tres

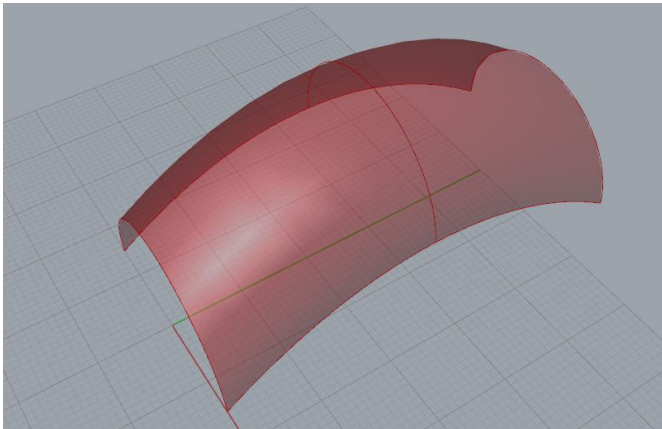
curvas construidas a través de un punto inicial y otro final mediante sus coordenadas X, Y, Z. Sus coordenadas X e Y serán manipulables mediante un *Slider* de tal manera que se podrá variar el ancho y la separación de las dos semicircunferencias dando lugar a una superficie variable. Una vez tenidos las tres curvas crearemos la superficie que la conforma con el comando *Loft*. A partir de aquí se seguirá el mismo proceso que utilizamos para elaborar la malla plana.



PASO 1

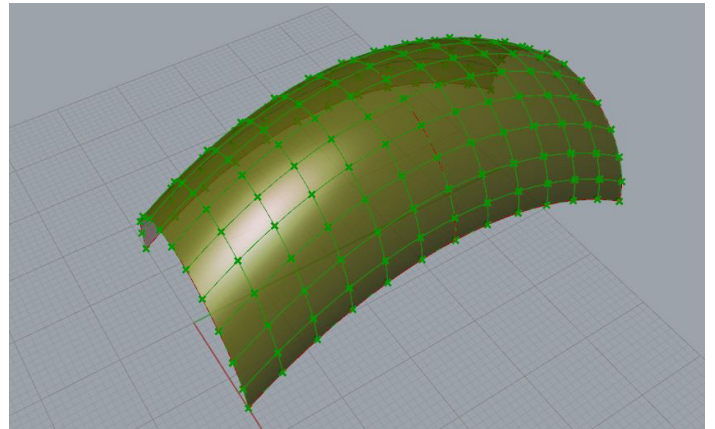
•Figura 25.

RESUMEN PASOS EN GRASSHOPPER



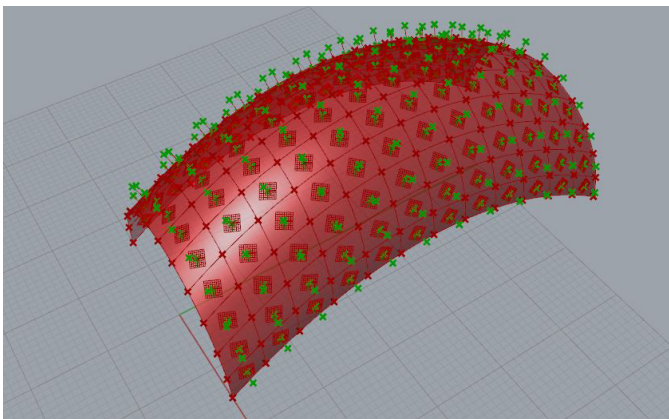
PASO 1

•Figura 26.



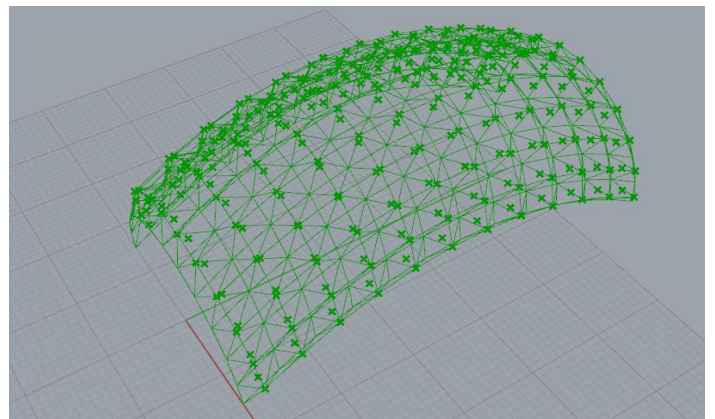
PASO 2

•Figura 27.



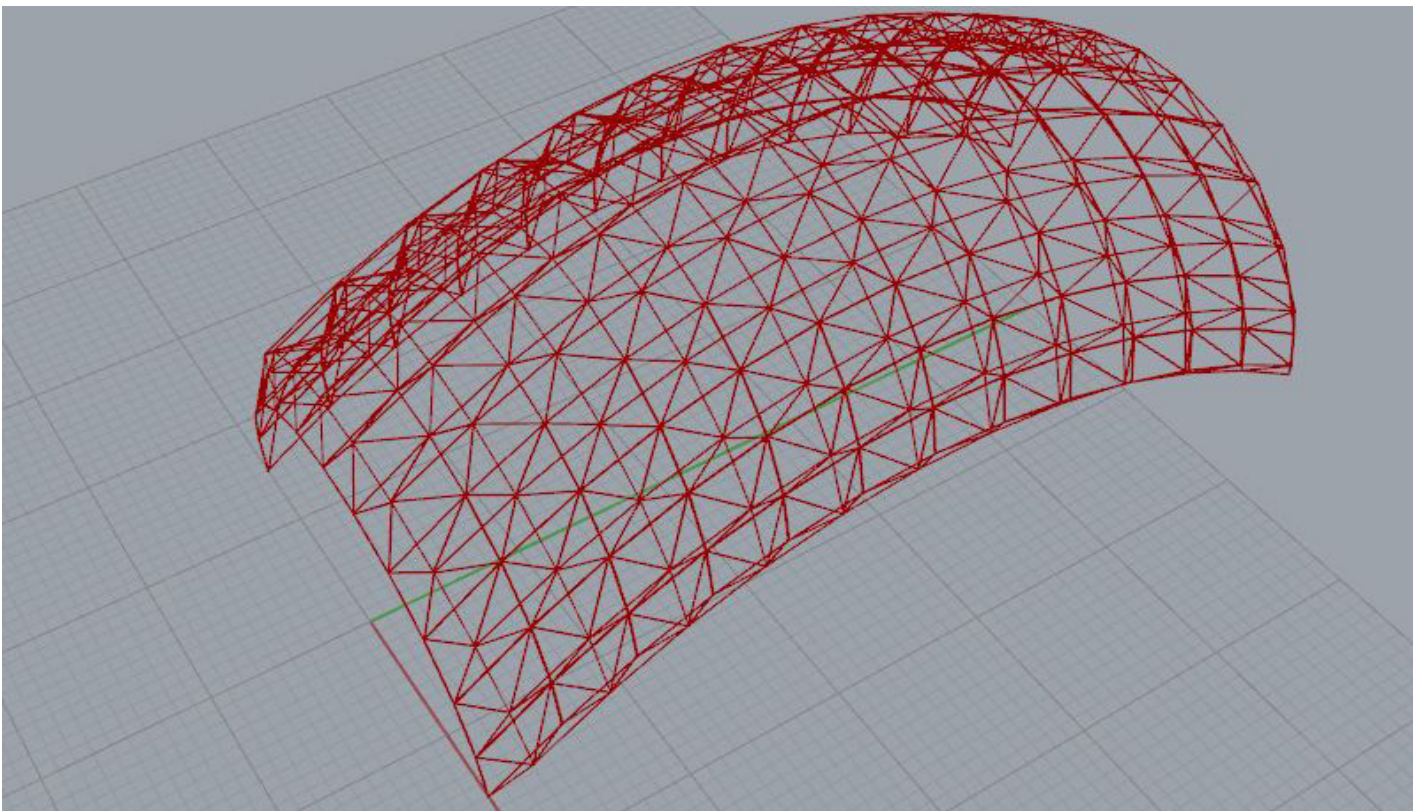
PASO 3

•Figura 28.



PASO 4

•Figura 29.



PASOS 5-6

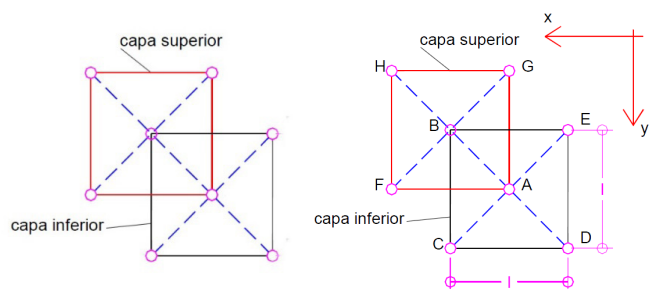
•Figura 30.

C0.1: MEMORIA DESCRIPTIVA

Una vez realizados los modelos a través de un software de diseño paramétrico el siguiente paso es saber los datos generales para introducir en el programa de cálculo, en este caso, Cype Ingenieros 2015.

Cada uno de los modelos tendrán como fin la cubrición de un recinto deportivo con una superficie de 30m de ancho por 60m de largo situado en la provincia de A Coruña. Esto quiere decir que nos encontramos en una clase ambiente IIa y a una cota inferior a los 1000m de altitud. Una vez introducidos los datos generales en el programa el siguiente paso es introducir cada uno de los modelos exportados a formato vectorial (Autocad 2014) desde el propio Grasshopper para poder empezar a asignar a cada modelo alámbrico el tipo de barra, el tipo de nudo, los apoyos y la introducción de las cargas.

Aunque cada modelo tiene una forma distinta todos ellos se componen de una retícula semioctaédrica con el esquema que se indica en las siguientes figuras.



•Figura 31.

En cuanto al material a emplear, la cubierta se construirá a través de perfiles tubulares de acero laminado S275JR de diámetros y espesores de chapa variables (según el tipo de malla) unidos unos a otros a través de nudos articulados tipo MERO. Para su cubrición se adoptó por chapas onduladas Trimoval TPo DOM de la marca comercial TRIMO.

C0.2: MODELOS DE CÁLCULO EMPLEADOS

Como ya he mencionado anteriormente, se ha utilizado el programa matricial Cype Ingenieros (Cype 3D) para su cálculo. Una vez introducido el modelo alámbrico el primer paso es definir todos sus nudos como articulaciones y establecer cuáles de ellos serán los apoyos de la estructura. El siguiente paso es asignar a cada "línea" el tipo

de barra y para ello se opta por crear una serie nueva de perfiles tubulares de acero desde 60mm hasta 360mm de diámetro y de espesores entre 10mm y 12,5mm.

Una vez asignado el tipo de barras y de nudos sólo queda calcular las cargas de uso, viento y nieve de una manera simplificada sobre cada nudo. Se ha decidido colocar las cargas puntuales en cada nudo para simplificar el proceso, entendiendo que de una manera más precisa deberían cargarse las barras en la dirección correspondiente y con sus longitudes reales.

Al ser una malla de 2 capas se considera sólo esfuerzos axiales y 3 incógnitas por nudo.

En el programa de cálculo se comprobarán 2 hipótesis:

- Peso propio + uso + viento (succión)
- Peso propio + uso + viento (succión) + nieve

C0.3: ESTIMACIÓN DE ACCIONES

-Carga permanente:

La estructura no tendrá forjado por tratarse de una estructura ligera de cubierta por lo que sólo se tendrá en cuenta el peso propio del material, en este caso se buscó en un catálogo comercial de TRIMO, en el que elegimos Chapa metálica ondulada Trimoval TPO DOM, con un peso de 6,20 kg/m².

Este valor será de aproximadamente 0,062 kN/m² que será multiplicado por fajas de carga según el tipo de malla estudiado para introducir en los nudos dibujados en el programa de cálculo.

-Sobrecarga de uso:

La cubierta será de clase G; cubiertas accesibles únicamente para conservación, siendo de la subcategoría G1. Cubiertas ligeras sobre correas (sin forjado), con una carga uniforme de 0,40 kN/m². Este valor indicado se refiere a la proyección horizontal de la superficie de la cubierta.

-Sobrecarga de nieve:

Al situarse en A Coruña la sobrecarga de nieve es 0,30kN/m².

-Sobrecarga de viento:

La cubierta está en A Coruña, que se trata de una zona eólica C con una velocidad básica de 29m/s. Se sitúa en la costa, por lo que tendrá un grado de aspereza 1; borde del mar o de un lago. Por lo tanto, el valor q_b (presión dinámica del viento) para A Coruña es de 0,52 kN/m², al situarse en zona C. El viento en A Co-

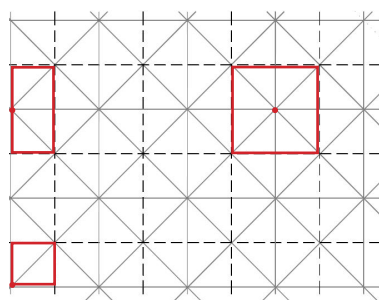
Los demás parámetros los calcularemos en cada apartado ya que cambian según el tipo de malla que estemos estudiando.

C1: CÁLCULO MALLA PLANA

C1.1- MALLA PLANA DE 3x3

C1.1.1- CÁLCULO DE ESFUERZOS

La primera estructura a calcular es la malla plana compuesta de semioctaedros con base cuadrada de 3x3m y una altura de 2m hasta el vértice. Como en el anterior apartado ya se ha definido toda la estructura, ahora necesitamos aplicarle las cargas que hemos calculado anteriormente. Para ello necesitamos saber las fajas de carga que emplearemos en esta malla. Como se trata de una malla con módulos de 3x3m nos quedaremos con:



•Figura 32.

- Nudos centrales: $L_x=L_y= 3,00\text{m}$
- Nudos de borde: $L_x= 1,50\text{m}$ $L_y= 3,00\text{m}$
- Nudos de esquina: $L_x=L_y= 1,50\text{m}$

Estas son las fajas por las que tenemos que multiplicar cada tipo de carga para obtener unas cargas puntuales para aplicar en cada nudo. De manera que las cargas finales que tenemos que aplicar a los nudos son las siguientes:

-Carga permanente: (0,062 kN/m²)

- Nudos centrales: 0,558 kN
- Nudos de borde: 0,279 kN
- Nudos de esquina: 0,140 kN

-Sobrecarga de uso: (0,40 kN/m²)

- Nudos centrales: 3,60 kN
- Nudos de borde: 1,80 kN
- Nudos de esquina: 0,90 kN

-Sobrecarga de nieve: (0,30kN/m²)W

- Nudos centrales: 2,70 kN
- Nudos de borde: 1,35 kN

-Nudos de esquina: 0,68kN

-Sobrecarga de viento: ($q_e=q_b \cdot c_e \cdot c_p$)

Como ya mencionamos anteriormente sabemos que el valor $q_b= 0,52 \text{ kN/m}^2$ pero nos falta por conocer otros valores. El coeficiente de exposición $c_e= 3,3$ al ser 15m la altura máxima de cubierta.

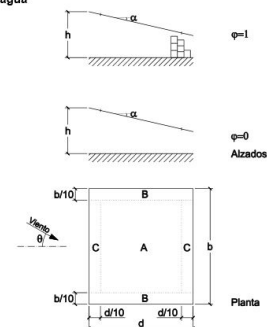
Tabla 3.4. Valores del coeficiente de exposición c_e

Grado de aspereza del entorno	Altura del punto considerado (m)									
	3	6	9	12	15	18	24	30		
I Borde del mar o de un lago, con una superficie de agua en la dirección del viento de al menos 5 km de longitud	2,4	2,7	3,0	3,1	3,3	3,4	3,5	3,7		
II Terreno rural llano sin obstáculos ni arbolado de importancia	2,1	2,5	2,7	2,9	3,0	3,1	3,3	3,5		
III Zona rural accidentada o llana con algunos obstáculos aislados, como árboles o construcciones pequeñas	1,6	2,0	2,3	2,5	2,6	2,7	2,9	3,1		
IV Zona urbana en general, industrial o forestal	1,3	1,4	1,7	1,9	2,1	2,2	2,4	2,6		
V Centro de negocio de grandes ciudades, con profusión de edificios en altura	1,2	1,2	1,2	1,4	1,5	1,6	1,9	2,0		

•Figura 33.

Para calcular el coeficiente de presión c_p empleamos la tabla D.10 del DB- SE-AE (marquesinas a un agua). Se considera una marquesina al ser un espacio abierto con cubierta plana. En este caso el factor de obstrucción se encuentra entre cero y uno ya que no se considera un recinto totalmente abierto.

Tabla D.10 Marquesinas a un agua



		Coeficientes de presión exterior			
		C _{p,10}			
Pendiente de la cubierta α	Efecto del viento hacia	Factor de obstrucción φ	Zona (según figura)		
			A	B	C
0º	Abajo	0 ≤ φ ≤ 1	0,5	1,8	1,1
	Arriba	0	-0,6	-1,3	-1,4
	Arriba	1	-1,5	-1,8	-2,2

•Figura 34.

- Nudos zona A: -23,17 kN
- Nudos zona B: -13,95 kN
- Nudos zona C: -16,95 kN
- Nudos de esquina: -6,98 kN

De esta manera las cargas finales a aplicar en los nudos son las siguientes:

TABLA CARGAS FINALES MALLA PLANA 3X3						
CARGAS (kN)	G	Quso	Qnieve	Qviento		
				A	B	C
Centrales	0,56	3,60	2,70	-23,17	-	-
Borde	0,28	1,80	1,35	-	-13,95	-16,95
Esquinas	0,14	0,90	0,68	-	-6,98	-

•Figura 35.

C1.1.2: DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA

Esta primera estructura consiste en una malla espacial plana de doble capa formada por módulos de semioctaedros. Estos semioctaedros tienen una base de 3x3m y una altura de 2m ligados unos a otros formando dos capas iguales pero compensadas entre sí para poder cubrir una superficie total de 30x60m.

-Perfiles:

Esta estructura está formada por perfiles tubulares de acero laminado S275JR. Se han elegido perfiles redondos debido a que solamente trabajarán bajo esfuerzos de axil (tracción o compresión) y no necesitan inercia para soportar ningún momento.

Características mecánicas						
Material		Descripción	A (cm²)	Avy (cm²)	Avz (cm²)	Iyy (cm4)
Tipo	Designación					Izz (cm4)
Acero laminado	S275	60x10, (redondos)	15.71	14.14	14.14	51.05
		70x10, (redondos)	18.85	16.96	16.96	87.18
		80x10, (redondos)	21.99	19.79	19.79	137.44
		90x12.5, (redondos)	30.43	27.39	27.39	234.44
		120x12.5, (redondos)	42.22	37.99	37.99	618.06
		100x10, (redondos)	28.27	25.45	25.45	289.81
		120x10, (redondos)	34.56	31.11	31.11	527.00
		90x10, (redondos)	25.13	22.62	22.62	204.20
		100x12.5, (redondos)	34.36	30.93	30.93	335.56
		60x12.5, (redondos)	18.65	16.79	16.79	56.25
		150x10, (redondos)	43.98	39.58	39.58	1083.06
		120x15, (redondos)	51.84	46.65	46.65	798.60
		80x12.5, (redondos)	26.51	23.86	23.86	156.14
		250x10, (redondos)	75.40	67.86	67.86	5438.10

•Figura 36.

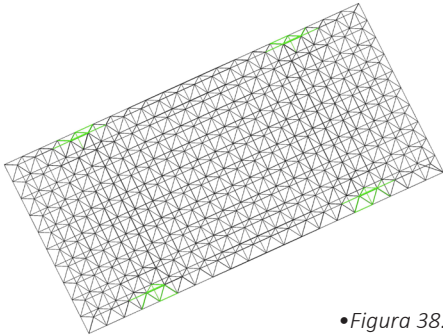
Aunque existen varios tipos de perfil empleados, en todo momento se intenta conseguir el máximo número posible de barras del mismo diámetro. De este modo, el tipo de perfil más utilizado es un perfil de 60mm de diámetro con un espesor de chapa de 10mm.

Acero laminado: Medición de las superficies			
Serie	Perfil	Longitud (m)	Superficie (m²)
redondos	60x10	2840989	535514
	70x10	552252	121447
	80x10	391031	98277
	90x12.5	15000	4241
	120x12.5	54000	20358
	100x10	192000	60319
	120x10	110662	41719
	90x10	292310	82649
	100x12.5	110662	34765
	60x12.5	59493	11214
	150x10	23324	10991
	120x15	53324	20940
	80x12.5	26662	6701
	250x10	12000	9425
	Total		1058558

•Figura 37.

Los perfiles de mayor diámetro son colocados en aquellas zonas de la estructura que necesitan absorber mayores esfuerzos. En la zona central de la estructura aumenta un poco el diámetro pero la zona más perjudicada es la de

los apoyos. Aquí los perfiles situados en la capa superior de los apoyos llegan hasta un diámetro de 250mm, destacando sobre todos los demás.



•Figura 38.

-Nudos y apoyos:

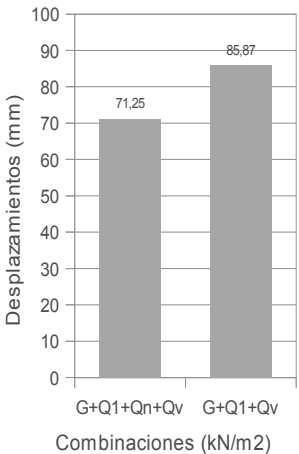
Todos los perfiles de esta estructura están unidos a través de nudos articulados materializados como nudo tipo MERO. De esta manera las barras sólo se transmiten esfuerzo axil pudiendo reducir considerablemente sus diámetros.

En cuanto a la vinculación exterior (apoyos), para conseguir el máximo rendimiento de la estructura se tuvo que renunciar a apoyarla solamente en sus cuatro esquinas debido a que se generaban grandes deformaciones en la parte central de la estructura. De este modo, tras varios análisis se ha llegado a la conclusión que para esta modulación de 3x3m el mejor apoyo para la estructura es reducir la luz central con dos apoyos intermedios separados seis metros de los otros apoyos de las esquinas. De esta manera se pudo reducir considerablemente la luz obteniendo una flecha máxima en la zona central menor que un L/500.

-Cargas y deformaciones:

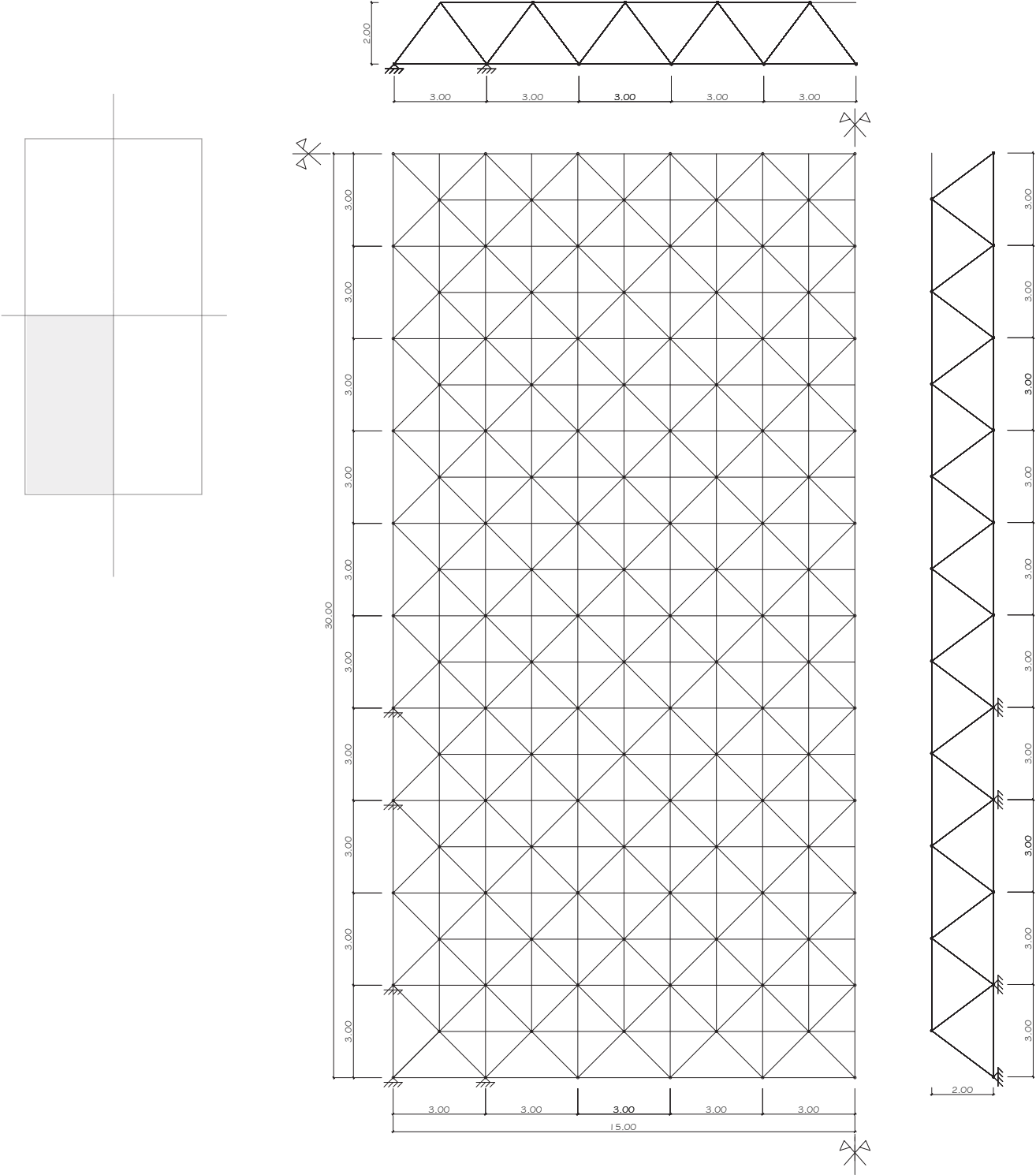
En cuanto a las cargas, se ha decidido colocar las cargas puntuales en cada nudo para simplificar el proceso, entendiendo que de una manera más precisa deberían cargarse las barras en la dirección correspondiente y con sus longitudes reales.

Se ha comprobado que la peor combinación para la estructura es la peso propio +uso + viento (succión) ya que la succión producida por el viento es la carga más grande de todas intentando desplazar la estructura hacia arriba. La deformación disminuye al introducir la carga de nieve ya que es una fuerza que va en sentido descendente (contraria al viento).



•Figura 39.

C1.1.3: ESQUEMAS GRÁFICOS DE IDEALIZACIÓN DE LA ESTRUCTURA

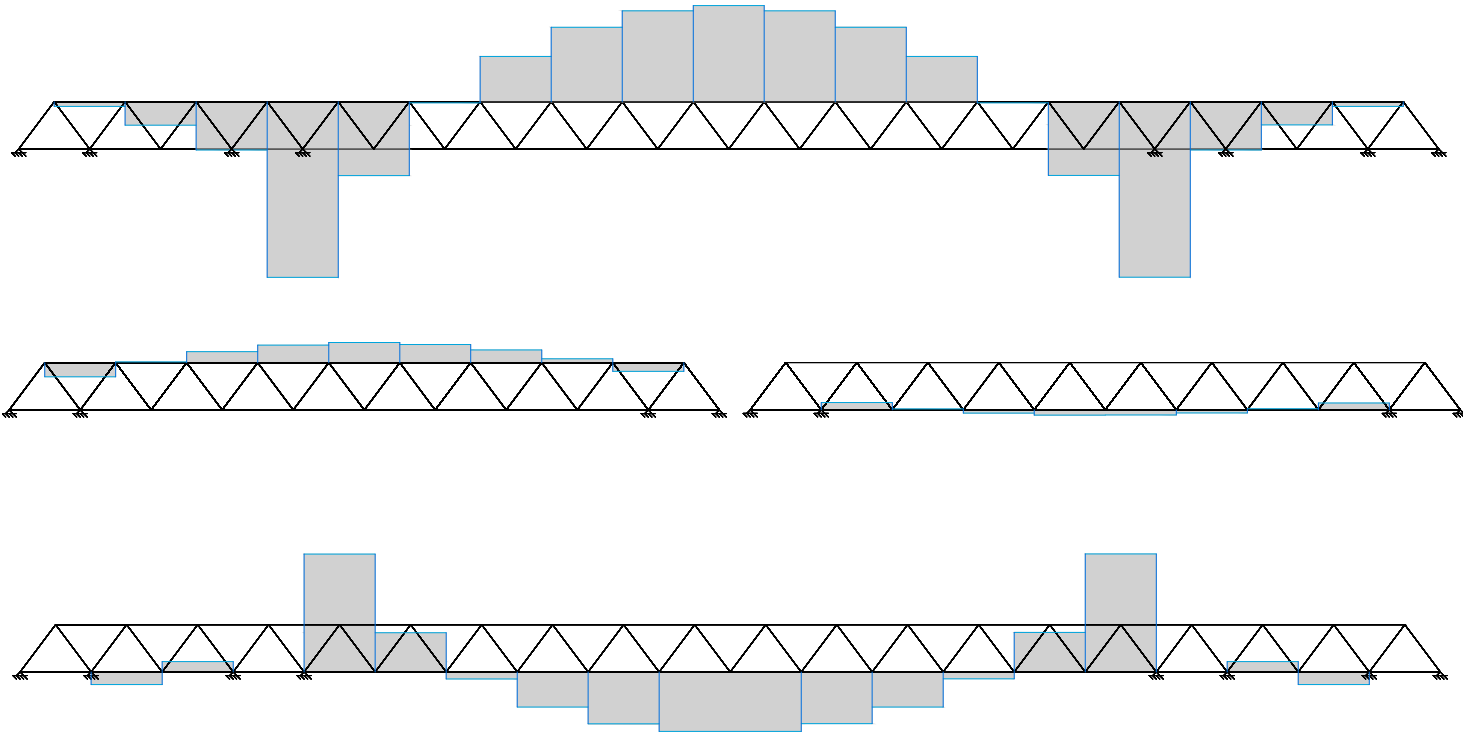


CARACTERISTICAS MALLA PLANA 3X3				
Dimensión: 10x20 módulos		Superficie: 30mx60m	Módulo:3x3m	Canto: 2m
Apoyada en cinco puntos en cada esquina			Apoyo: articulación	
Deformación	G+Quso+Qnieve+Qviento= 71,25mm < L/250			
	G+Quso+Qviento= 85,87mm < L/250			
Peso	40,68 Kg/m²			

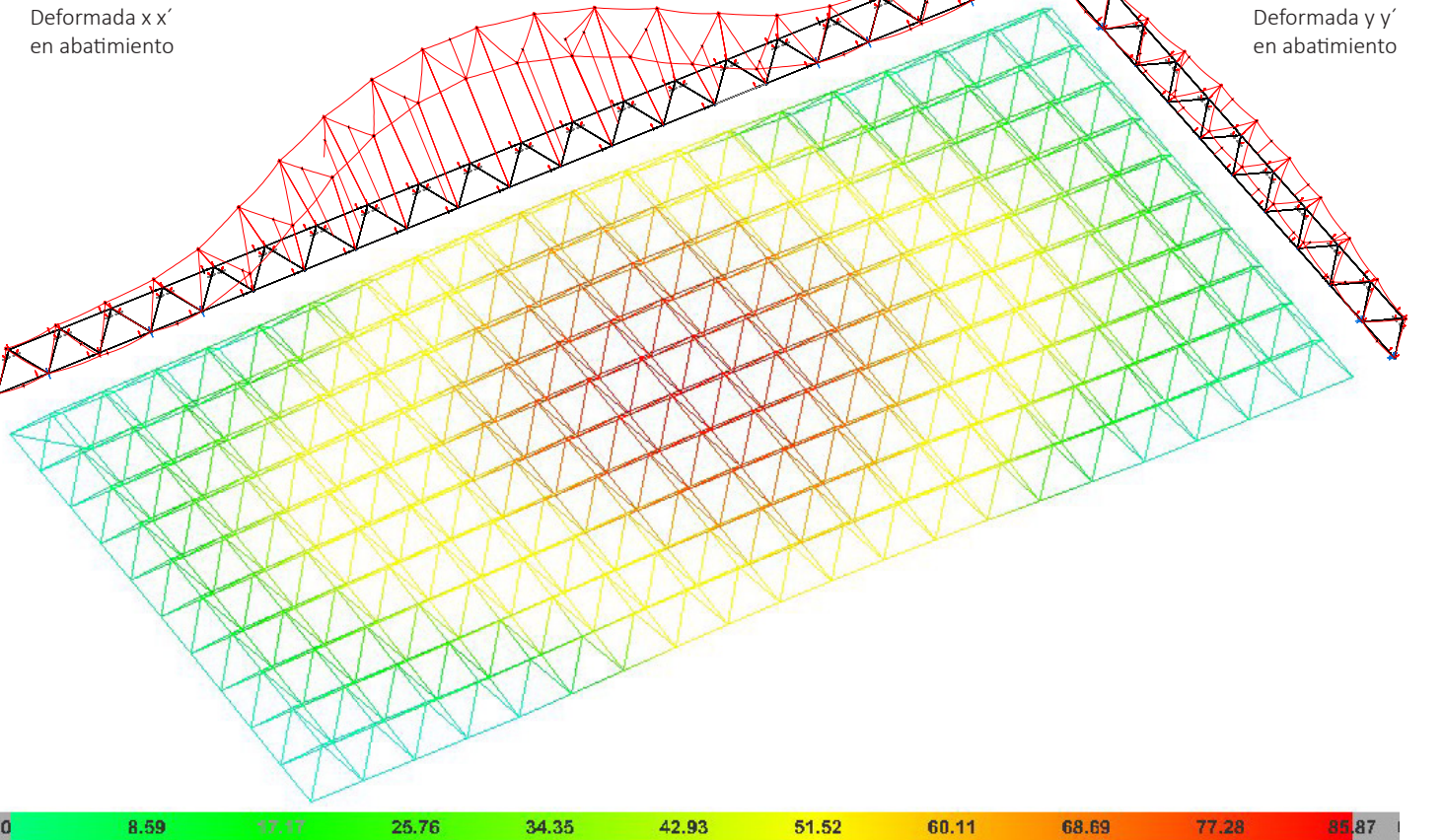
•Figura 40.

C1.1.3: ESQUEMAS GRÁFICOS DE IDEALIZACIÓN DE LA ESTRUCTURA

-AXILES



-DEFORMADA



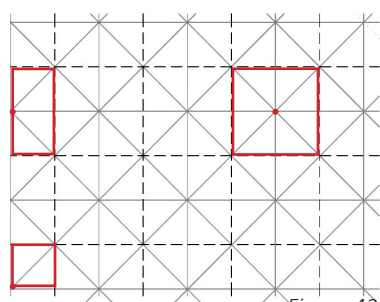
•Figura 41.

C1: CÁLCULO MALLA PLANA

C1.2- MALLA PLANA DE 4x4

C1.2.1- CÁLCULO DE ESFUERZOS

La siguiente estructura es una malla plana compuesta de semioctaedros con base cuadrada de 4x4m y una altura de 2m hasta el vértice. De igual modo que en la estructura anterior necesitamos calcular las fajas de carga por las que hay que multiplicar las cargas obtenidas en el apartado de estimación de acciones. En este caso se trata de una malla con módulos de 4x4m por lo que sus fajas de carga serán las siguientes:



•Figura 42.

- Nudos centrales: $L_x=L_y= 4,00\text{m}$
- Nudos de borde: $L_x= 2,00\text{m}$ $L_y= 4,00\text{m}$
- Nudos de esquina: $L_x=L_y= 2,00\text{m}$

Estas son las fajas por las que tenemos que multiplicar cada tipo de carga para obtener unas cargas puntuales para aplicar en cada nudo.

De manera que las cargas finales que tenemos que aplicar a los nudos son las siguientes:

-Carga permanente: (0,062 kN/m²)

- Nudos centrales: 1,00 kN
- Nudos de borde: 0,50 kN
- Nudos de esquina: 0,25 kN

-Sobrecarga de uso: (0,40 kN/m²)

- Nudos centrales: 6,40 kN
- Nudos de borde: 3,20 kN
- Nudos de esquina: 1,60 kN

-Sobrecarga de nieve: (0,30kN/m²)W

- Nudos centrales: 4,80 kN
- Nudos de borde: 2,40 kN
- Nudos de esquina: 1,20kN

-Sobrecarga de viento: ($q_e=q_b \cdot c_e \cdot c_p$)

Como ya mencionamos anteriormente sabemos que el valor $q_b= 0,52 \text{ kN/m}^2$ pero nos falta por conocer otros valores. El coeficiente de exposición $c_e= 3,3$ al ser 15m la altura máxima de cubierta.

Para calcular el coeficiente de presión c_p empleamos la tabla D.10 del DB- SE-AE (marquesinas a un agua). Se considera una marquesina al ser un espacio abierto con cubierta plana. En este caso el factor de obstrucción se encuentra entre cero y uno ya que no se considera un recinto totalmente abierto.

- Nudos zona A: -41,18 kN
- Nudos zona B: -24,80 kN
- Nudos zona C: -30,08 kN
- Nudos de esquina: -12,40 kN

TABLA CARGAS FINALES MALLA PLANA 4X4						
CARGAS (kN)	G	Quso	Qnieve	Qviento		
				A	B	C
Centrales	1,00	6,40	4,80	-41,18	-	-
Borde	0,50	3,20	2,40	-	-24,80	-30,08
Esquinas	0,25	1,60	1,20	-	-12,40	-

•Figura 43.

C1.2.2: DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA

Esta siguiente estructura consiste en una malla espacial plana de doble capa formada por módulos de semioctaedros. Estos semioctaedros tienen una base de 4x4m y una altura de 2m ligados unos a otros formando dos capas iguales pero compensadas entre sí para poder cubrir una superficie total de 30x60m.

-Perfiles:

Esta estructura está formada por perfiles tubulares de acero laminado S275JR. Se han elegido perfiles redondos debido a que solamente trabajarán bajo esfuerzos de axil (tracción o compresión) y no necesita inercia para soportar ningún momento.

Material		Ref.	Descripción	Características mecánicas					
				A (cm ²)	Avy (cm ²)	Avz (cm ²)	Iyy (cm ⁴)	Izz (cm ⁴)	It (cm ⁴)
Tipo	Designación								
Acero laminado	S275	1	80x10, (redondos1)	21.99	19.79	19.79	137.44	137.44	274.89
		2	60x10, (redondos1)	15.71	14.14	14.14	51.05	51.05	102.10
		3	90x10, (redondos1)	25.13	22.62	22.62	204.20	204.20	408.41
		4	120x12.5, (redondos1)	42.22	37.99	37.99	618.06	618.06	1236.11
		5	100x10, (redondos1)	28.27	25.45	25.45	289.81	289.81	579.62
		6	300x10, (redondos1)	91.11	82.00	82.00	9588.93	9588.93	19177.85
		7	120x100, (redondos1)	34.56	31.20	31.20	527.00	527.00	1054.00
		8	150x10, (redondos1)	43.98	39.58	39.58	1083.06	1083.06	2166.13
		9	200x100, (redondos1)	59.69	53.72	53.72	2700.98	2700.98	5401.97
		10	150x12.5, (redondos1)	54.00	48.60	48.60	1286.63	1286.63	2573.25
		11	100x12.5, (redondos1)	34.36	30.93	30.93	335.56	335.56	671.12
		12	90x12.5, (redondos1)	30.43	27.39	27.39	234.44	234.44	468.88
		13	310x12.5, (redondos1)	116.83	105.15	105.15	12947.83	12947.83	25895.65

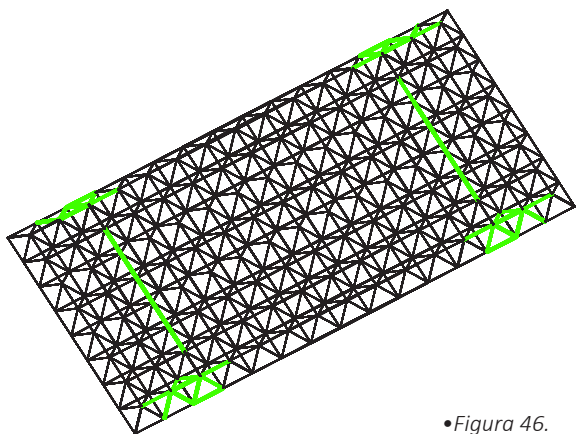
•Figura 44.

Aunque existen varios tipos de perfil empleados, en todo momento se intenta conseguir el máximo número posible de barras del mismo diámetro. En este caso, el tipo de perfil más utilizado es un perfil de 80mm de diámetro con un espesor de chapa de 10mm.

Acero laminado: Medición de las superficies			
Serie	Perfil	Longitud (m)	Superficie (m ²)
redondos	80x10	1839227	462248
	60x10	47000	8859
	90x10	280026	79175
	120x12.5	194824	73447
	100x10	191902	60288
	300x10	98472	92807
	120x100	184685	69624
	150x10	233898	110222
	200x100	96324	60522
	150x12.5	84824	39972
	100x12.5	95935	30139
	90x12.5	23500	6644
	310x12.5	16000	15582
	Total		1109531

•Figura 45.

Los perfiles de mayor diámetro son colocados en aquellas zonas de la estructura que necesitan absorber mayores esfuerzos. En la zona central de la estructura aumenta un poco el diámetro pero la zona más perjudicada es la de los apoyos. Aquí los perfiles situados en la capa superior de los apoyos llegan hasta un diámetro de 310mm y un espesor de chapa de 12,5mm, destacando sobre todos los demás.



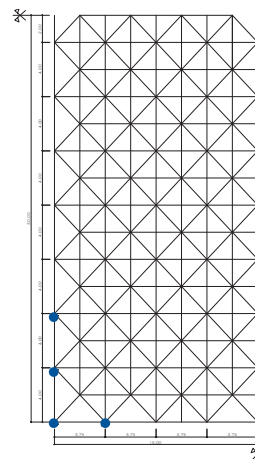
•Figura 46.

-Nudos y apoyos:

Todos los perfiles de esta estructura están unidos a través de nudos articulados materializados como nudo tipo MERO. De esta manera las barras sólo se transmiten esfuerzo axial pudiendo reducir considerablemente sus diámetros.

En cuanto a la vinculación exterior (apoyos), para conseguir el máximo rendimiento de la estructura se tuvo que renunciar a apoyarla solamente en sus cuatro esquinas debido a que se generaban grandes deformaciones en

la parte central de la estructura. De este modo, tras varios análisis se ha llegado a la conclusión que para esta modulación de 4x4m el mejor apoyo para la estructura es apoyarla en los cuatro nudos de las dos pirámides de cada esquina. De esta manera se pudo reducir considerablemente la luz obteniendo una flecha máxima en la zona central menor que un L/500.

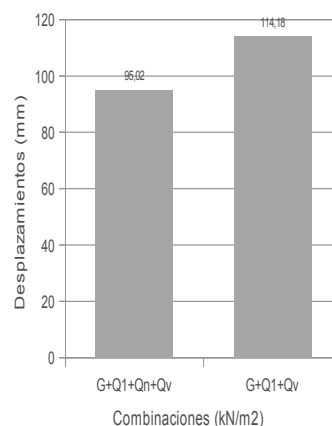


•Figura 47.

-Cargas y deformaciones:

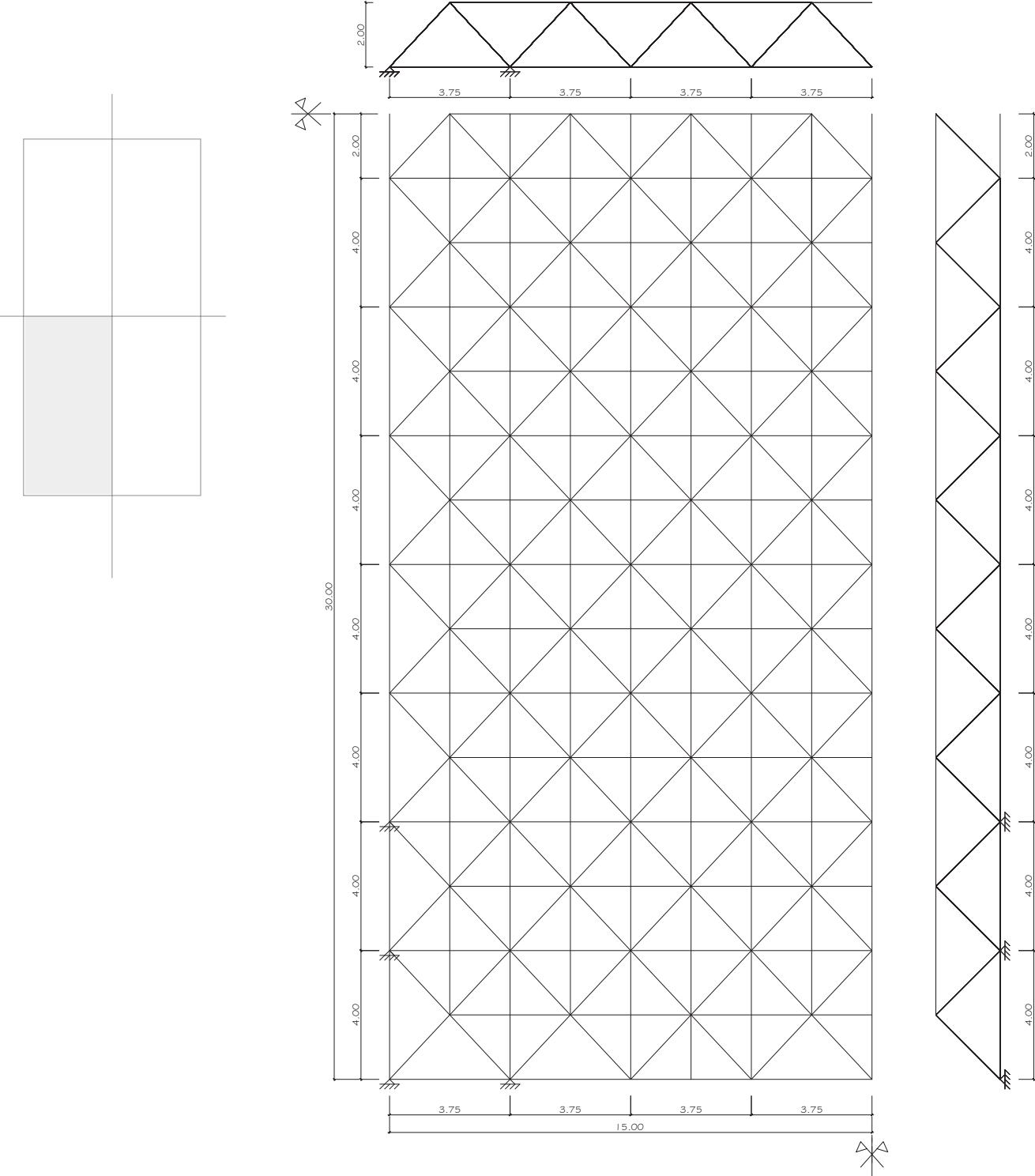
En cuanto a las cargas, se ha decidido colocar las cargas puntuales en cada nudo para simplificar el proceso, entendiendo que de una manera más precisa deberían cargarse las barras en la dirección correspondiente y con sus longitudes reales.

Se ha comprobado que la peor combinación para la estructura es la peso propio + uso + viento (succión) ya que la succión producida por el viento es la carga más grande de todas intentando desplazar la estructura hacia arriba. La deformación disminuye al introducir la carga de nieve ya que es una fuerza que va en sentido descendente (contraria al viento).



•Figura 48.

C1.2.3: ESQUEMAS GRÁFICOS DE IDEALIZACIÓN DE LA ESTRUCTURA

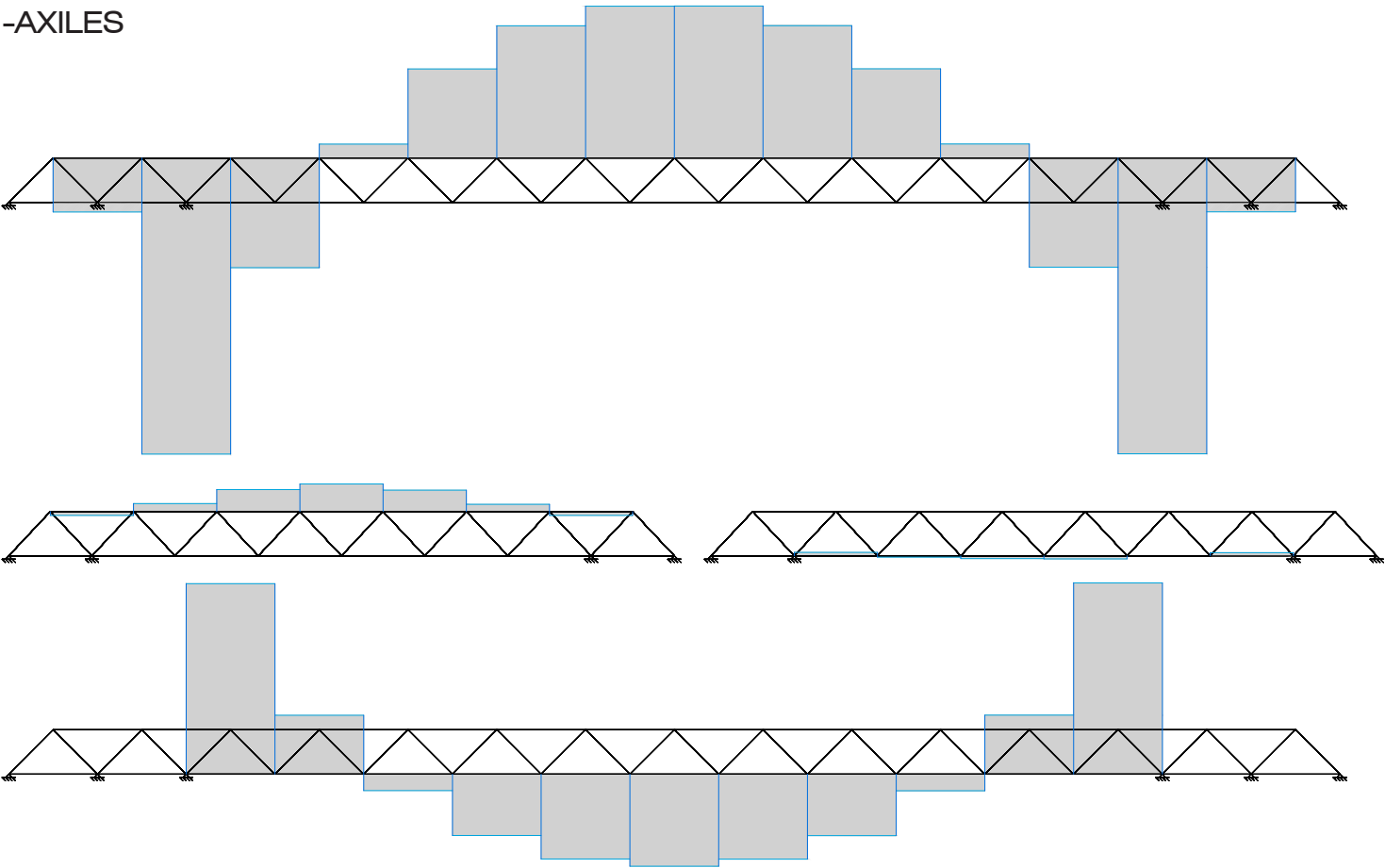


CARACTERISTICAS MALLA PLANA 4X4			
Dimensión: 8x15 módulos		Superficie: 30mx60m	Módulo: 4x4m
Apoyada en cuatro puntos en cada esquina			Canto: 2m
Deformación	Apoyo: articulación		
	G+Quso+Qnieve+Qviento= 95,02mm < L/250		
	G+Quso+Qviento= 114,18mm < L/250		
Peso	45,24 Kg/m²		

•Figura 49.

C1.2.3: ESQUEMAS GRÁFICOS DE IDEALIZACIÓN DE LA ESTRUCTURA

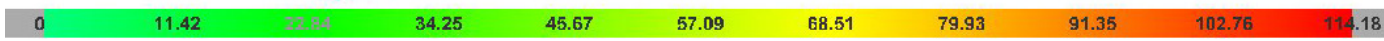
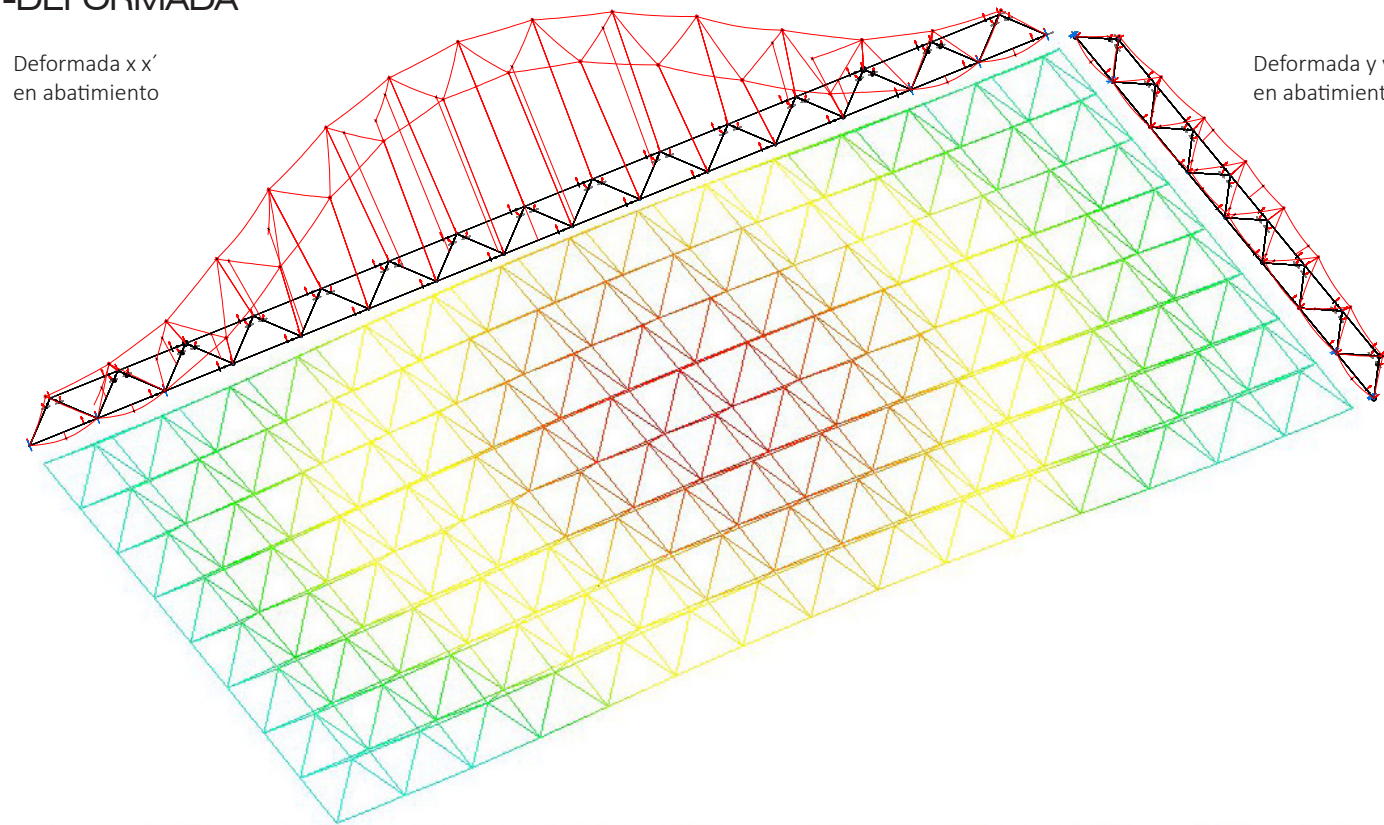
-AXILES



-DEFORMADA

Deformada x x' en abatimiento

Deformada y y' en abatimiento



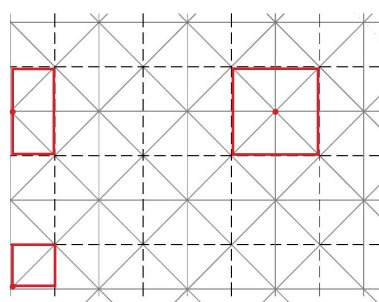
•Figura 50.

C1: CÁLCULO MALLA PLANA

C1.3- MALLA PLANA DE 5x5

C1.3.1- CÁLCULO DE ESFUERZOS

La última estructura de malla plana a analizar está compuesta de semioctaedros con base cuadrada de 4x4m y una altura de 2m hasta el vértice. De igual modo que en las estructuras anteriores necesitamos calcular las fajas de carga por las que hay que multiplicar las cargas obtenidas en el apartado de estimación de acciones. En este caso se trata de una malla con módulos de 4x4m por lo que sus fajas de carga serán las siguientes:



•Figura 51.

- Nudos centrales: $L_x=L_y= 5,00\text{m}$
- Nudos de borde: $L_x= 2,50\text{m}$ $L_y= 5,00\text{m}$
- Nudos de esquina: $L_x=L_y= 2,50\text{m}$

Estas son las fajas por las que tenemos que multiplicar cada tipo de carga para obtener unas cargas puntuales para aplicar en cada nudo.

De manera que las cargas finales que tenemos que aplicar a los nudos son las siguientes:

-Carga permanente: (0,062 kN/m²)

- Nudos centrales: 1,55 kN
- Nudos de borde: 0,78 kN
- Nudos de esquina: 0,39 kN

-Sobrecarga de uso: (0,40 kN/m²)

- Nudos centrales: 10,00 kN
- Nudos de borde: 5,00 kN
- Nudos de esquina: 2,50 kN

-Sobrecarga de nieve: (0,30kN/m²)_W

- Nudos centrales: 7,50 kN
- Nudos de borde: 3,75 kN
- Nudos de esquina: 1,87kN

-Sobrecarga de viento: ($q_e=q_b \cdot c_e \cdot c_p$)

Como ya mencionamos anteriormente sabemos que el valor $q_b= 0,52 \text{ kN/m}^2$ pero nos falta por conocer otros valores. El coeficiente de exposición $c_e= 3,3$ al ser 15m la altura máxima de cubierta.

Para calcular el coeficiente de presión c_p empleamos la tabla D.10 del DB- SE-AE (marquesinas a un agua). Se considera una marquesina al ser un espacio abierto con cubierta plana. En este caso el factor de obstrucción se encuentra entre cero y uno ya que no se considera un recinto totalmente abierto.

- Nudos zona A: -64,35 kN
- Nudos zona B: -38,75 kN
- Nudos zona C: -47,00 kN
- Nudos de esquina: -19,38 kN

TABLA CARGAS FINALES MALLA PLANA 5X5						
CARGAS (kN)	G	Quso	Qnieve	Qviento		
				A	B	C
Centrales	1,55	10,00	7,50	-64,35	-	-
Borde	0,78	5,00	3,75	-	-38,75	-47,00
Esquinas	0,39	2,50	1,87	-	-19,38	-

•Figura 52.

C1.3.2: DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA

Esta estructura consiste en una malla espacial plana de doble capa formada por módulos de semioctaedros. Estos semioctaedros tienen una base de 5x5m y una altura de 2m ligados unos a otros formando dos capas iguales pero compensadas entre sí para poder cubrir una superficie total de 30x60m.

-Perfiles:

Esta estructura está formada por perfiles tubulares de acero laminado S275JR. Se han elegido perfiles redondos debido a que solamente trabajarán bajo esfuerzos de axil (tracción o compresión) y no necesita inercia para soportar ningún momento.

Características mecánicas						
Material		Ref.	Descripción	A (cm ²)	Avy (cm ²)	Avz (cm ²)
Tipo	Designación					
Acero laminado	S275	1	120x12.5, (redondos1)	42.22	37.99	37.99
		2	60x10, (redondos1)	15.71	14.14	14.14
		3	150x12.5, (redondos1)	54.00	48.60	48.60
		4	100x10, (redondos1)	28.27	25.45	25.45
		5	300x10, (redondos1)	91.11	82.00	82.00
		6	150x10, (redondos1)	43.98	39.58	39.58
		7	200x100, (redondos1)	59.69	53.72	53.72
		8	120x100, (redondos1)	34.56	31.20	31.20
		9	90x10, (redondos1)	25.13	22.62	22.62
		10	320x12.5, (redondos1)	120.75	108.68	108.68
		11	300X12.5, (redondos1)	112.90	101.61	101.61
		12	80x10, (redondos1)	21.99	19.79	19.79
		13	100x12.5, (redondos1)	34.36	30.93	30.93
		14	90x12.5, (redondos1)	30.43	27.39	27.39
		15	360x12.5, (redondos1)	136.46	122.82	122.82

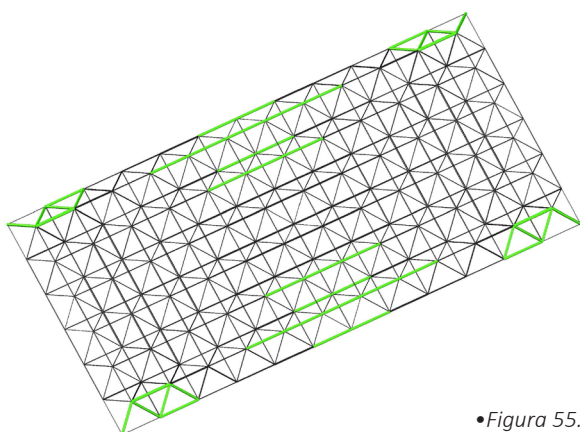
•Figura 53.

Aunque existen varios tipos de perfil empleados, en todo momento se intenta conseguir el máximo número posible de barras del mismo diámetro. En este caso, el tipo de perfil más utilizado es un perfil de 100mm de diámetro con un espesor de chapa de 10mm.

Acero laminado: Medición de las superficies			
Serie	Perfil	Longitud (m)	Superficie (m ²)
redondos	120x12.5	158744	59845
	60x10	88744	16728
	150x12.5	132496	62437
	100x10	547488	171999
	300x10	172496	162574
	150x10	142496	67150
	200x100	260000	163363
	120x100	206248	77754
	90x10	113737	32158
	320x12.5	16248	16334
	300x12.5	16248	15313
	80x10	649923	163343
	100x12.5	68744	21597
	90x12.5	16248	4594
	360x12.5	20000	22619
Total			1057809

•Figura 54.

Los perfiles de mayor diámetro son colocados en aquellas zonas de la estructura que necesitan absorber mayores esfuerzos. En la zona central de la estructura aumenta un poco el diámetro pero la zona más perjudicada es la de los apoyos. Aquí los perfiles situados en la capa superior de los apoyos llegan hasta un diámetro de 360mm y un espesor de chapa de 12,5mm, destacando sobre todos los demás.



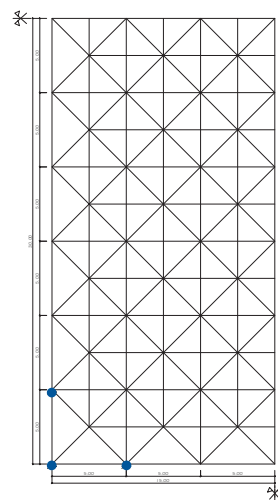
•Figura 55.

-Nudos y apoyos:

Todos los perfiles de esta estructura están unidos a través de nudos articulados materializados como nudo tipo MERO. De esta manera las barras sólo se transmiten esfuerzo axial pudiendo reducir considerablemente sus diámetros.

En cuanto a la vinculación exterior (apoyos), la estructura se apoya en las esquinas pero no sólo en un punto ya que tanto las barras como el nudo de apoyo no lo soportaban.

Manteniendo la idea de apoyo en las esquinas se opta por apoyarla en tres puntos en cada esquina correspondientes a los tres nudos de la base de la pirámide. De esta manera se pudo reducir considerablemente la luz obteniendo una flecha máxima en la zona central menor que un $L/400$.

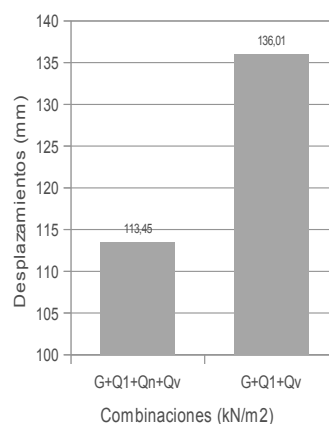


•Figura 56.

-Cargas y deformaciones:

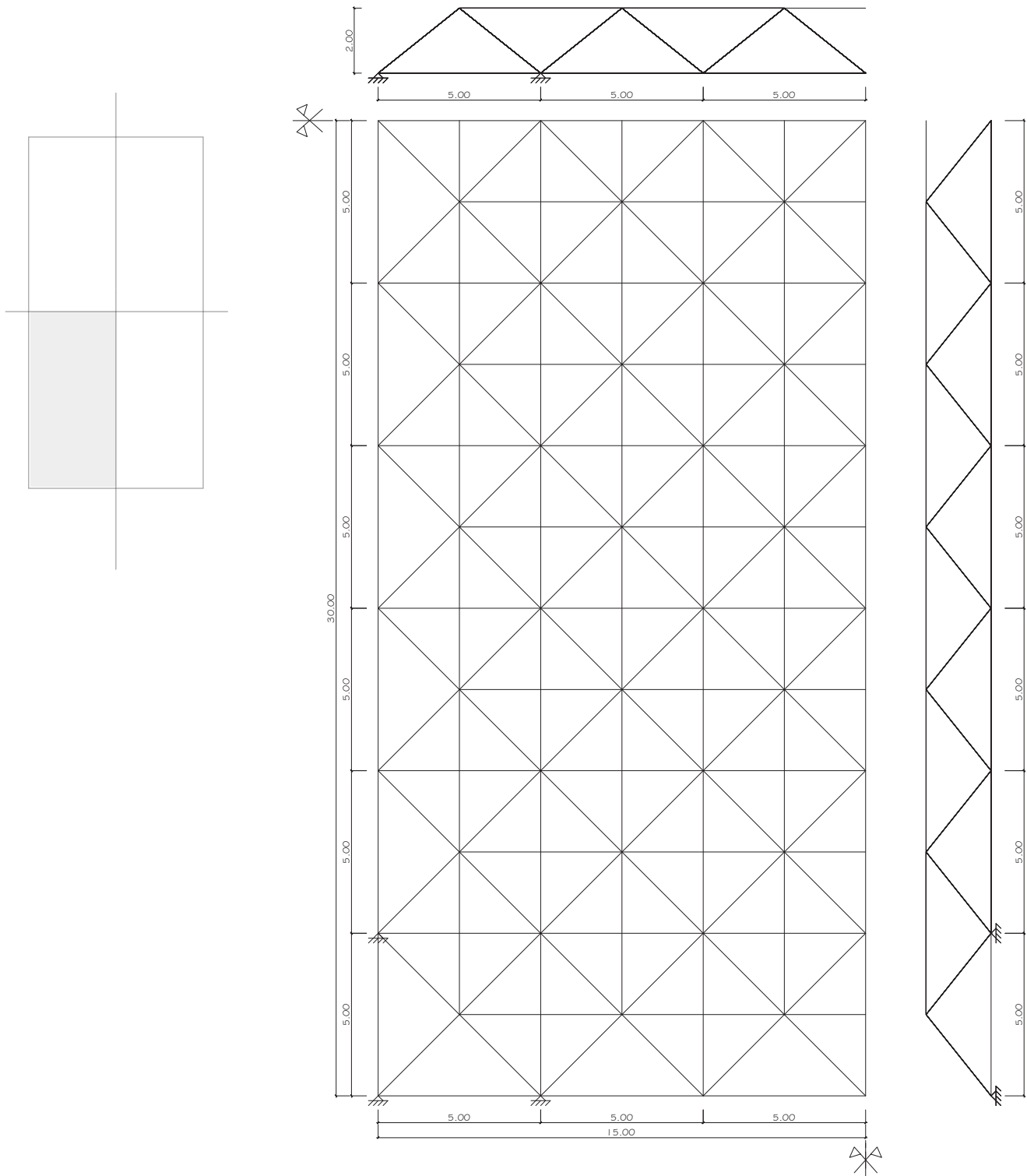
Se ha decidido colocar las cargas puntuales en cada nudo para simplificar el proceso, entendiendo que de una manera más precisa deberían cargarse las barras en la dirección correspondiente y con sus longitudes reales.

Se ha comprobado que la peor combinación para la estructura es la peso propio + uso + viento (succión) ya que la succión producida por el viento es la carga más grande de todas intentando desplazar la estructura hacia arriba. La deformación disminuye al introducir la carga de nieve ya que es una fuerza que va en sentido descendente (contraria al viento).



•Figura 57.

C1.3.3: ESQUEMAS GRÁFICOS DE IDEALIZACIÓN DE LA ESTRUCTURA

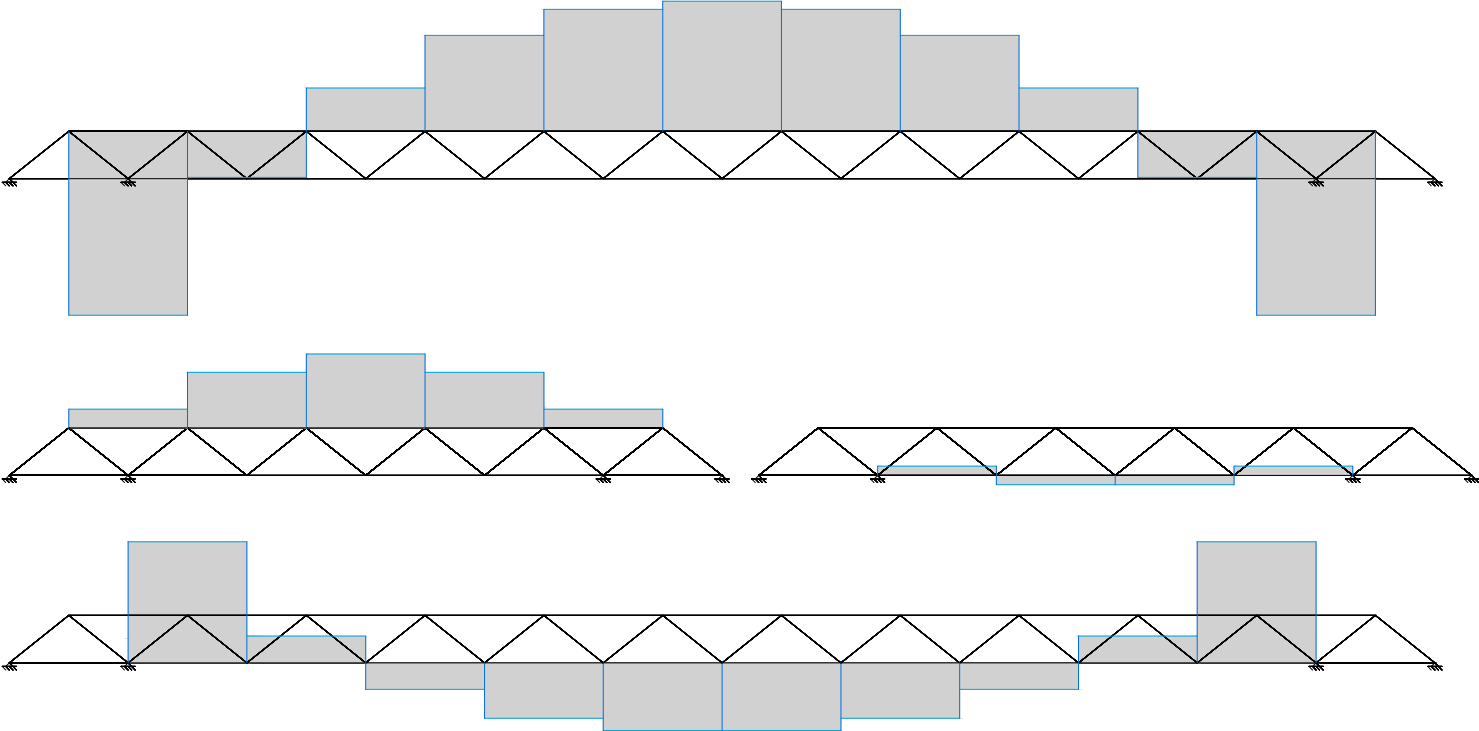


CARACTERISTICAS MALLA PLANA 5X5				
Dimensión: 6x12 módulos		Superficie: 30mx60m	Módulo:5x5m	Canto: 2m
Apoyada en tres puntos en cada esquina			Apoyo: articulación	
Deformación	G+Quso+Qnieve+Qviento= 113,45mm < L/250			
	G+Quso+Qviento= 136,01mm < L/250			
Peso	44,44 Kg/m²			

•Figura 58.

C1.3.3: ESQUEMAS GRÁFICOS DE IDEALIZACIÓN DE LA ESTRUCTURA

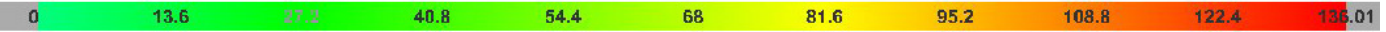
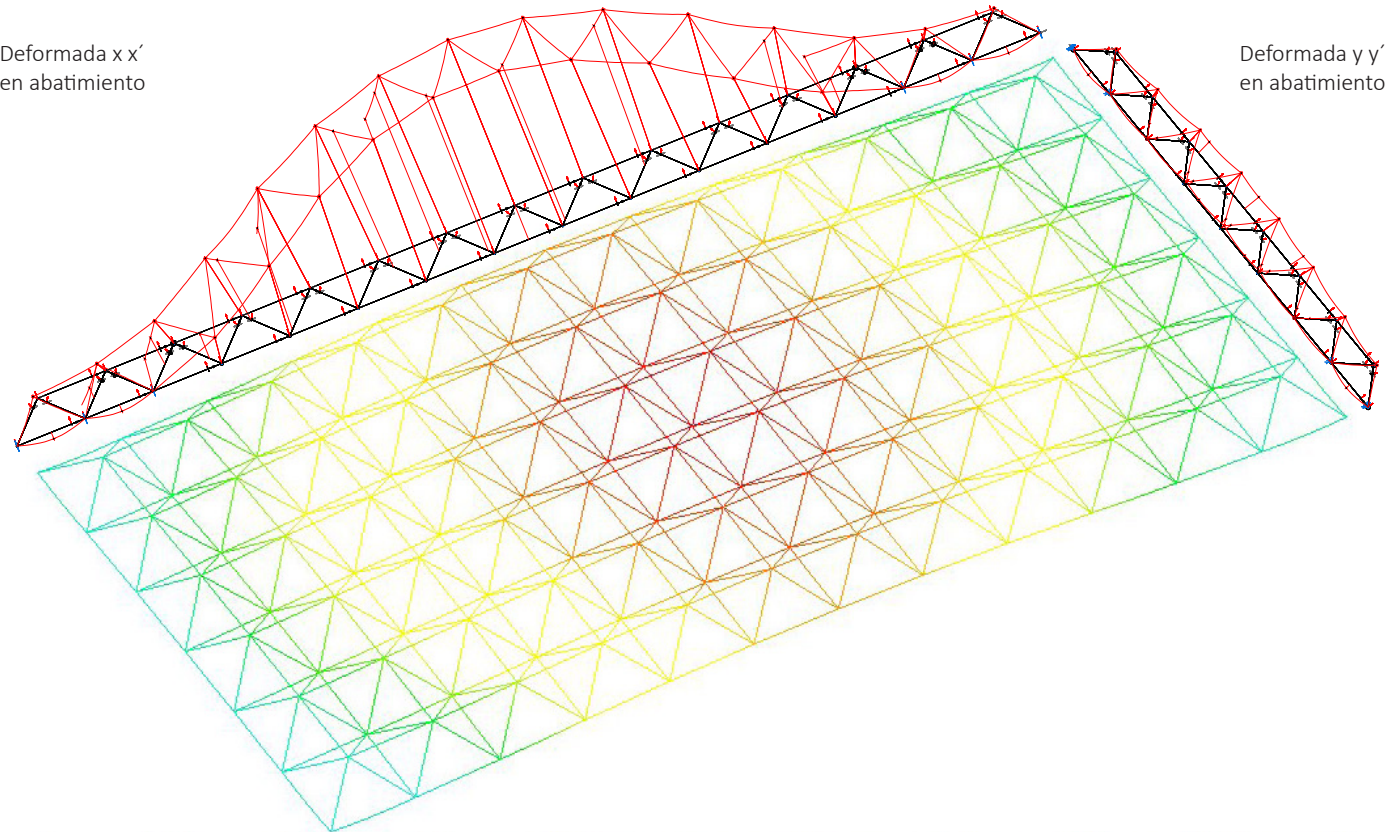
-AXILES



-DEFORMADA

Deformada x x' en abatimiento

Deformada y y' en abatimiento

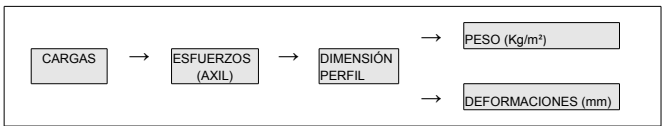


•Figura 59.

C1.4: COMPARACIÓN ENTRE LAS MALLAS PLANAS

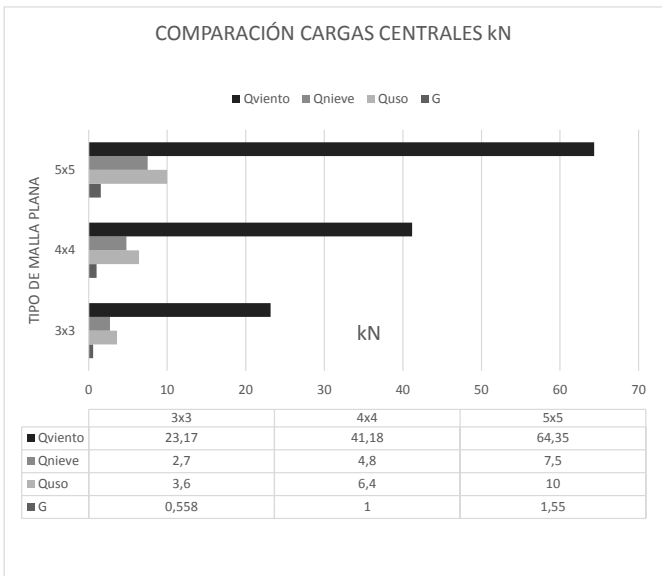
Los anteriores estudios sobre los tres tipos de módulos (3x3, 4x4, 5x5) de malla plana de doble capa se han realizado para poder determinar cuál es la mejor dimensión de la base del módulo semioctaédrico que mejor funciona para cubrir una superficie de 30x60m con una superficie de 1800m².

Para ello nos centraremos en los datos obtenidos en los anteriores apartados para poder compararlos y analizarlos intentando llegar a la estructura plana que mejor responda a esta dimensión de superficie adaptándose a las necesidades que necesita un programa deportivo.



•Figura 60.

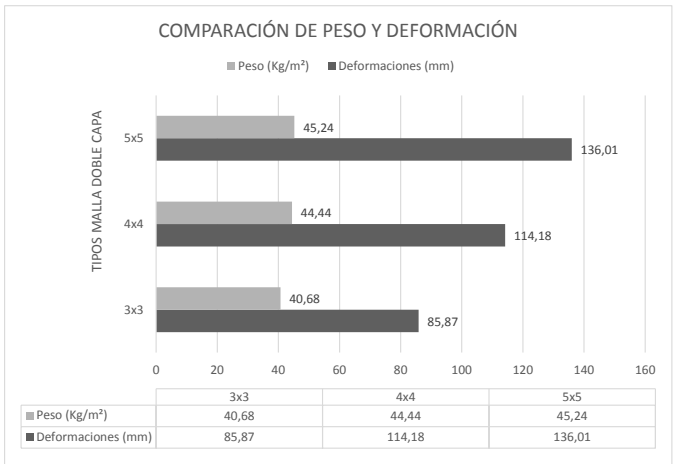
Comenzamos este estudio del mismo modo que empezamos cada apartado de cada uno de los tres tipos de estructura; las cargas a aplicar. Como ya observamos, todas las cargas (permanentes o variables) por metro cuadrado son las mismas en las tres estructuras. La diferencia está que al variar la dimensión de la base del semioctaedro cambia la faja de carga por la que hay que multiplicar cada una de las cargas anteriores. De este modo mayor dimensión del módulo mayor faja de carga y por lo tanto mayor carga a aplicar en los nudos.



•Figura 61.

En este gráfico se puede comprobar como aumenta la carga aumentando dimensión del módulo siendo la carga variable de viento la más perjudicada. Todo esto nos lleva a que necesitaremos perfiles de mayor diámetro para soportar cargas mayores. De esta manera, la estructura de módulo 5x5 necesitará mayores perfiles para absorber estas grandes cargas pero también tendrá más fácil la cumplimiento de la solicitud a pandeo al hablar de longitudes sobre unos cinco metros.

Será el número y tipo de perfil a emplear los que determinen el peso de la estructura y de alguna manera su deformación (esfuerzos y perfiles). En una primera visión que había tenido mientras realizaba los diferentes estudios es que había pensado que la malla de 3x3 iba a pesar mucho más pesada debido a que tenía muchas más barras que el módulo 5x5. Pero esto no fue así, ya que aunque eran muchas más barras, sus dimensiones eran menores (perfil dominante de 60mm de diámetro frente al perfil de 100mm en el caso del módulo 5x5) y el peso final de la estructura quedaba compensado por el número de barras.



•Figura 62.

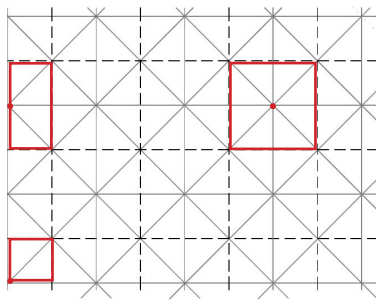
En conclusión, aunque en una primera visión la malla plana de doble capa de 3x3 parecía la más pesada por su gran número de barras es la que menos pesa (40,68 Kg/m²) y además es la que menos deformación sufre. Con este resultado se obtiene que para una malla plana de doble capa el módulo de 3x3 es el que mejor responde a la cubrición de una superficie de 30x60m bajo un programa deportivo.

C2: CÁLCULO MALLA CILÍNDRICA

C2.1- MALLA CILÍNDRICA DE 3x3

C2.1.1- CÁLCULO DE ESFUERZOS

El siguiente modelo estructural es una malla cilíndrica de doble capa. Está también compuesta de semioctaedros con base cuadrada de 3x3m y una distancia hasta el vértice de 2m. De la misma manera que hicimos con la malla plana, lo primero a calcular son las fajas de carga por las que hay que multiplicar las cargas obtenidas en el apartado estimación de cargas. En este caso se trata de una malla con módulos de 3x3m por lo que sus fajas de carga serán las siguientes:



•Figura 63.

- Nudos centrales: $L_x=L_y= 3,00\text{m}$
- Nudos de borde: $L_x= 1,50\text{m}$ $L_y= 3,00\text{m}$
- Nudos de esquina: $L_x=L_y= 1,50\text{m}$

Estas son las fajas por las que tenemos que multiplicar cada tipo de carga para obtener unas cargas puntuales para aplicar en cada nudo.

De manera que las cargas finales que tenemos que aplicar a los nudos son las siguientes:

-Carga permanente: (0,062 kN/m²)

- Nudos centrales: 0,558 kN
- Nudos de borde: 0,279 kN
- Nudos de esquina: 0,140 kN

-Sobrecarga de uso: (0,40 kN/m²)

- Nudos centrales: 3,60 kN
- Nudos de borde: 1,80 kN
- Nudos de esquina: 0,90 kN

-Sobrecarga de nieve: (0,30kN/m²)W

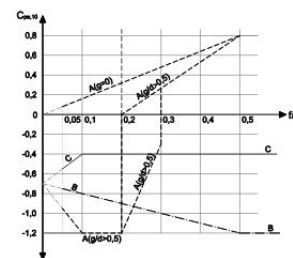
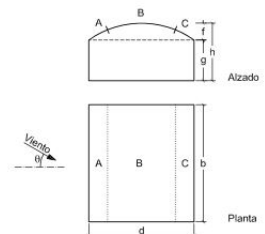
- Nudos centrales: 2,70 kN
- Nudos de borde: 1,35 kN
- Nudos de esquina: 0,68kN

-Sobrecarga de viento: ($q_e=q_b \cdot c_e \cdot c_p$)

Como ya mencionamos anteriormente sabemos que el valor $q_b= 0,52 \text{ kN/m}^2$ pero nos falta por conocer otros valores. El coeficiente de exposición $c_e= 3,4$ al ser 17m la altura máxima de cubierta. Para calcular el coeficiente de presión c_p empleamos la tabla D.12 del DB- SE-AE (cubiertas cilíndricas). Aplicando los esquemas resulta una relación de $f/d= 17/30= 0,56$ y $g/d= 0$, por lo que tendremos de coeficiente de presión exterior:

- Zona A: 0,85 (presión)
- Zona B: -1,20 (succión)
- Zona C: -0,40 (succión)

Tabla D.12 Cubiertas cilíndricas



Notas:

- Para $0 < g/d < 0,5$, el coeficiente de presión exterior, $c_{pe,10}$, correspondiente a la superficie A, se obtendrá mediante interpolación lineal.
- Para $0,2 \leq f/d \leq 0,3$ y $g/d \geq 0,5$, se adoptará el más desfavorable de los dos posibles valores del coeficiente de presión exterior, $c_{pe,10}$, correspondiente a la zona A.

•Figura 64.

Con estos datos se calcula la presión estática q_e ($q_e=q_b \times c_e \times c_p$), que variará según la zona en la que nos encontremos:

- Zona A: $q_e= 0,52 \times 3,40 \times 0,85 = 1,50 \text{ kN/m}^2$
- Zona B: $q_e= 0,52 \times 3,40 \times (-1,20) = -2,12 \text{ kN/m}^2$
- Zona C: $q_e= 0,52 \times 3,40 \times (-0,40) = -0,71 \text{ kN/m}^2$

Estos valores son de presión o succión en el exterior. Al tratarse de una superficie cilíndrica no se considera una construcción diáfana por lo que no se calculan las presiones en el interior.

TABLA CARGAS FINALES MALLA CILÍNDRICA 3X3						
CARGAS (kN)	G	Quso	Qnieve	Qviento		
				A	B	C
Centrales	0,56	3,60	2,70	-	-19,80	-
Borde	0,28	1,80	1,35	6,75	-	-3,20
Esquinas	0,14	0,90	0,68	3,38	-	-1,60

•Figura 65.

C2.1.2: DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA

Esta estructura consiste en una malla espacial cilíndrica de doble capa formada por módulos piramidales. Estas pirámides tienen una base cuadrada de 3x3m y una altura de 2m ligadas unas a otras formando dos capas iguales pero compensadas entre sí para poder cubrir una superficie total de 30x60m.

-Perfiles:

Esta estructura está formada por perfiles tubulares de acero laminado S275JR. Se han elegido perfiles redondos debido a que solamente trabajarán bajo esfuerzos de axil (tracción o compresión) y no necesita inercia para soportar ningún momento.

Características mecánicas						
Material		Ref.	Descripción	A (cm²)	Avy (cm²)	Avz (cm²)
Tipo	Designación					Iyy (cm4)
Acero laminado	S275	1	80x10, (redondos1)	21.99	19.79	137.44
		2	90x10, (redondos1)	25.13	22.62	204.20
		3	100x10, (redondos1)	28.27	25.45	289.81
		4	60x10, (redondos1)	15.71	14.14	51.05
		5	60x12.5, (redondos1)	18.65	16.79	56.25

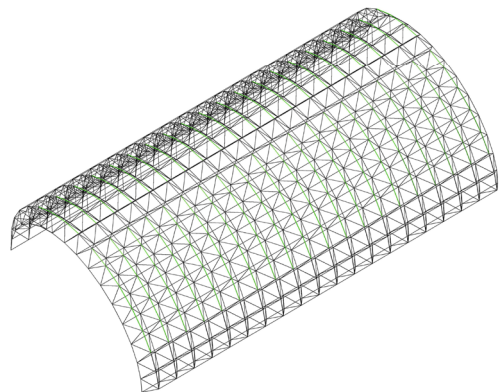
•Figura 66.

En este caso, como la estructura se comporta como una especie de bóveda y por lo tanto más estable por sí misma que una malla plana existen solo cinco tipo de perfiles empleados. El tipo de perfil más utilizado es un perfil de 60mm de diámetro con un espesor de chapa de 10mm.

Acero laminado: Medición de las superficies			
Serie	Perfil	Longitud (m)	Superficie (m²)
redondos1	80x10	645970	162350
	90x10	129597	36643
	100x10	82938	26056
	60x10	6706631	1264170
	60x12.5	67916	12802
Total			1502021

•Figura 67.

Los perfiles de mayor diámetro son colocados en aquellas zonas de la estructura que necesitan absorber mayores esfuerzos.



•Figura 68.

En este caso las barras con mayor diámetro son las que forman los cordones superiores que recorren la estructura transversalmente y unen los dos apoyos que están en la misma línea pero en lados opuestos. Estas barras van desde los 80mm de diámetro hasta los 100mm en la parte central de estos cordones.

-Nudos y apoyos:

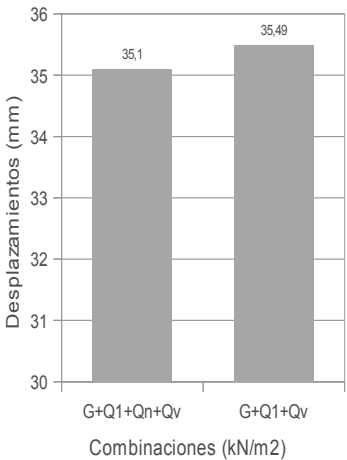
Todos los perfiles de esta estructura están unidos a través de nudos articulados materializados como nudo tipo MERO. De esta manera las barras sólo se transmiten esfuerzo axil pudiendo reducir considerablemente sus diámetros.

Al ser una estructura con forma de bóveda se opta por apoyarla a lo largo de las dos líneas que forman los nudos en contacto con el terreno. De esta manera, la estructura sólo tiene que salvar la distancia pequeña, unos 30m. El problema de salvar los 60m de luz en una dirección queda solucionado haciendo que sea fácil cumplir una restricción de un L/500 para una luz de 30m.

-Cargas y deformaciones:

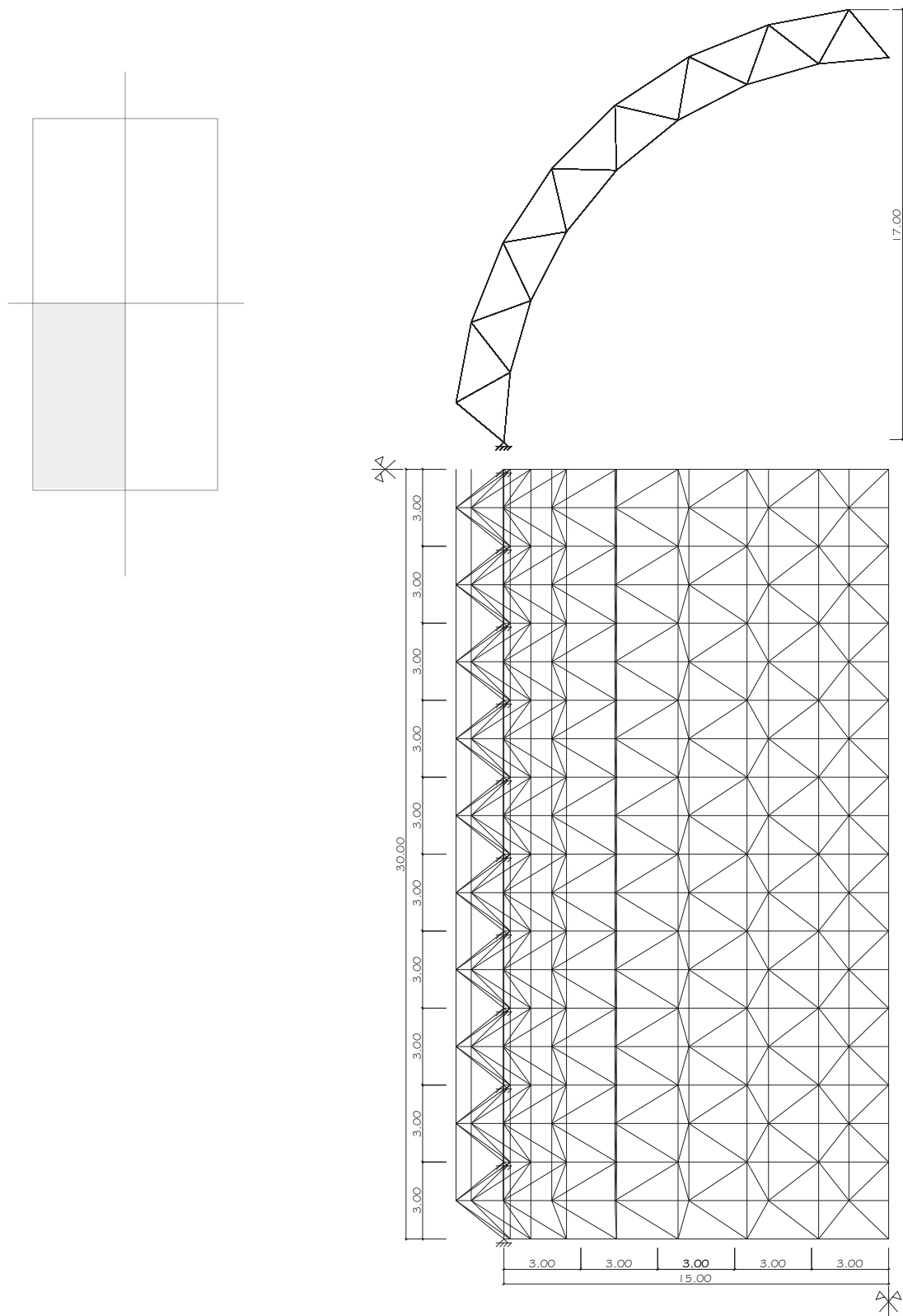
En cuanto a las cargas, se han decidido colocarlas puntuales en cada nudo para simplificar el proceso, entendiendo que de una manera más precisa deberían cargarse las barras en la dirección correspondiente y con sus longitudes reales.

Se ha comprobado que la peor combinación para la estructura es la peso propio + uso + viento (succión) ya que la succión producida por el viento es la carga más grande de todas intentando desplazar la estructura hacia arriba. Pero en este tipo de estructura cilíndrica no hay tanta diferencia en deformación teniendo en cuenta la carga variable de nieve.



•Figura 69.

C2.1.3: ESQUEMAS GRÁFICOS DE IDEALIZACIÓN DE LA ESTRUCTURA

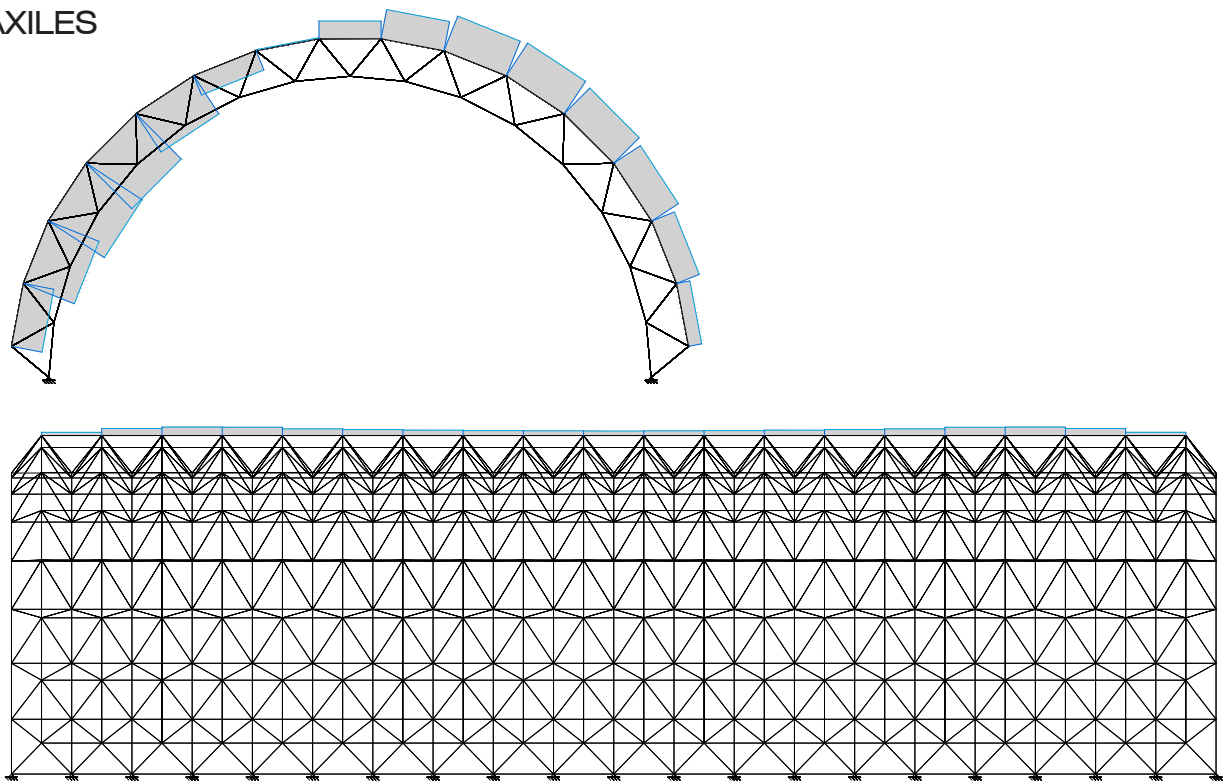


CARACTERISTICAS MALLA CILINDRICA 3X3				
Dimensión: 16x20 módulos		Superficie: 30mx60m	Módulo: 3x3m	Canto: 2m
Apoyada a lo largo de los dos bordes			Apoyo: articulación	
Deformación	G+Quso+Qnieve+Qviento= 35,10 mm < L/250			
	G+Quso+Qviento= 35,49 mm < L/250			
Peso	55,13 Kg/m²			

•Figura 70.

C2.1.3: ESQUEMAS GRÁFICOS DE IDEALIZACIÓN DE LA ESTRUCTURA

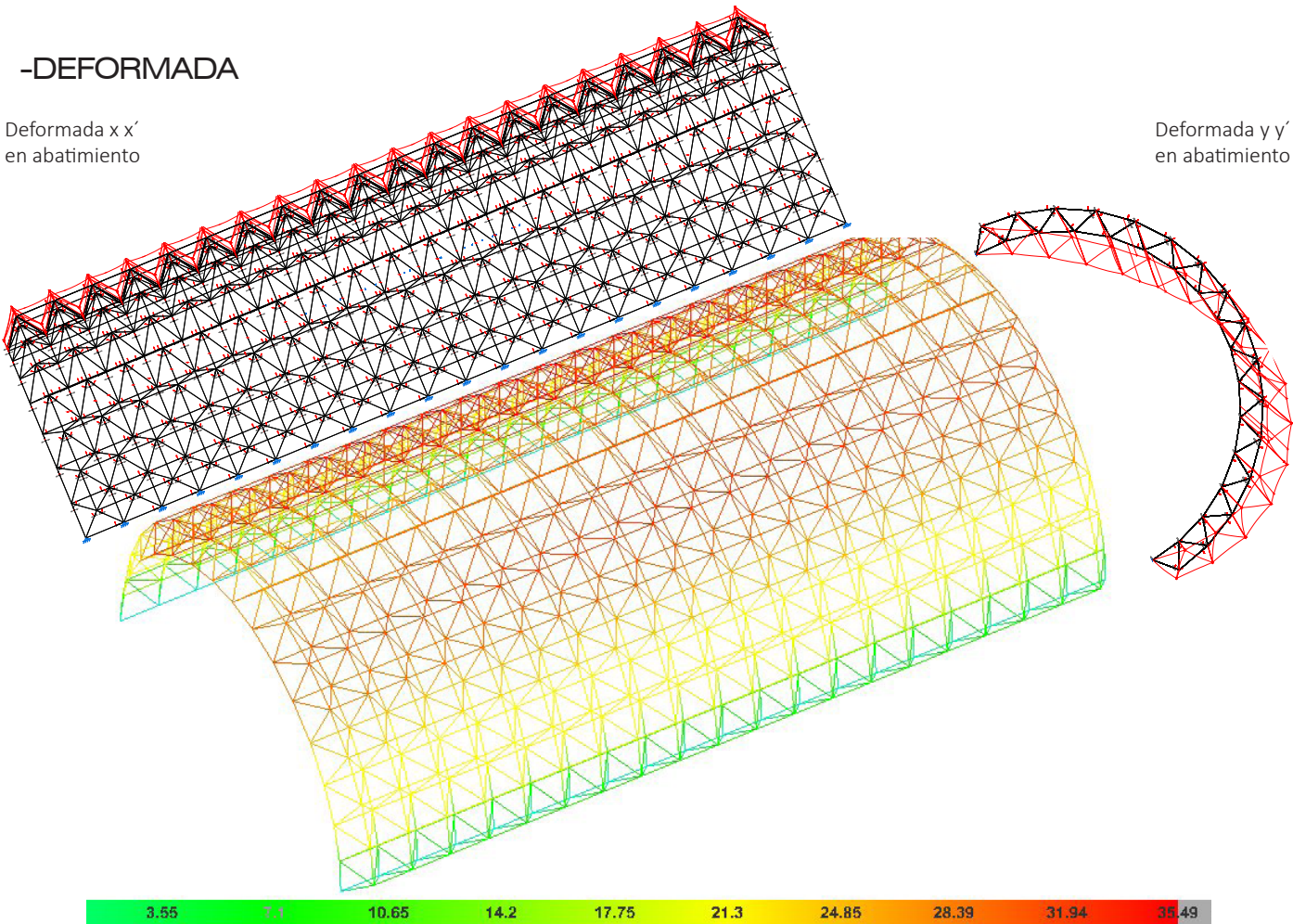
-AXILES



-DEFORMADA

Deformada x x' en abatimiento

Deformada y y' en abatimiento

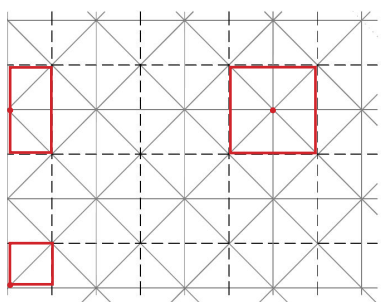


•Figura 71.

C2.2- MALLA CILÍNDRICA DE 4x4

C2.2.1- CÁLCULO DE ESFUERZOS

El siguiente modelo estructural es una malla cilíndrica de doble capa. Está también compuesta de semioctaedros con base cuadrada de 4x4m y una distancia hasta el vértice de 2m. De la misma manera que hicimos con la malla plana, lo primero a calcular son las fajas de carga por las que hay que multiplicar las cargas obtenidas en el apartado estimación de cargas. En este caso se trata de una malla con módulos de 4x4m por lo que sus fajas de carga serán las siguientes:



•Figura 72.

- Nudos centrales: $L_x=L_y= 4,00\text{m}$
- Nudos de borde: $L_x= 2,00\text{m}$ $L_y= 4,00\text{m}$
- Nudos de esquina: $L_x=L_y= 2,00\text{m}$

Estas son las fajas por las que tenemos que multiplicar cada tipo de carga para obtener unas cargas puntuales para aplicar en cada nudo.

De manera que las cargas finales que tenemos que aplicar a los nudos son las siguientes:

-Carga permanente: (0,062 kN/m²)

- Nudos centrales: 1,00 kN
- Nudos de borde: 0,50 kN
- Nudos de esquina: 0,25 kN

-Sobrecarga de uso: (0,40 kN/m²)

- Nudos centrales: 6,40 kN
- Nudos de borde: 3,20 kN
- Nudos de esquina: 1,60 kN

-Sobrecarga de nieve: (0,30kN/m²)W

- Nudos centrales: 4,80 kN
- Nudos de borde: 2,40 kN
- Nudos de esquina: 1,20kN

-Sobrecarga de viento: ($q_e=q_b \cdot c_e \cdot c_p$)

Como ya mencionamos anteriormente sabemos que el valor $q_b= 0,52 \text{ kN/m}^2$ pero nos falta por conocer otros valores. El coeficiente de exposición $c_e= 3,4$ al ser 17m la altura máxima de cubierta. Para calcular el coeficiente de presión c_p empleamos la tabla D.12 del DB- SE-AE (cubiertas cilíndricas). Aplicando los esquemas resulta una relación de $f/d= 17/30= 0,56$ y $g/d= 0$, por lo que tendremos de coeficiente de presión exterior:

- Zona A: 0,85 (presión)
- Zona B: -1,20 (succión)
- Zona C: -0,40 (succión)

Con estos datos se calcula la presión estática q_e , ($q_e=q_b \times c_e \times c_p$), que variará según la zona en la que nos encontremos:

- Zona A: $q_e= 0,52 \times 3,40 \times 0,85 = 1,50 \text{ kN/m}^2$
- Zona B: $q_e= 0,52 \times 3,40 \times (-1,20) = -2,12 \text{ kN/m}^2$
- Zona C: $q_e= 0,52 \times 3,40 \times (-0,40) = -0,71 \text{ kN/m}^2$

Estos valores son de presión o succión en el exterior. Al tratarse de una superficie cilíndrica no se considera una construcción diáfana por lo que no se calculan las presiones en el interior.

TABLA CARGAS FINALES MALLA CILÍNDRICA 4X4						
CARGAS (kN)	G	Quso	Qnieve	Qviento		
				A	B	C
Centrales	1,00	6,40	4,80	-	-33,92	-
Borde	0,50	3,20	2,40	12,00	-	-5,68
Esquinas	0,25	1,60	1,20	6,00	-	-2,84

•Figura 73.

C2.2.2: DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA

Esta estructura consiste en una malla espacial cilíndrica de doble capa formada por módulos de semioctaedros. Estos semioctaedros tienen una base de 4x4m y una altura de 2m ligados unos a otros formando dos capas iguales pero compensadas entre sí para poder cubrir una superficie total de 30x60m.

-Perfiles:

Esta estructura está formada por perfiles tubulares de acero laminado S275JR. Se han elegido perfiles redondos debido a que solamente trabajarán bajo esfuerzos de axil (tracción o compresión) y no necesita inercia para soportar ningún momento.

Características mecánicas						
Material		Ref.	Descripción	A (cm ²)	Avy (cm ²)	Avz (cm ²)
Tipo	Designación					Iyy (cm ⁴)
Acero laminado	S275	1	100x12.5, (redondos1)	34.36	30.93	30.93
		2	120x12.5, (redondos1)	42.22	37.99	37.99
		3	150x10, (redondos1)	43.98	39.58	39.58
		4	120x100, (redondos1)	34.56	31.20	31.20
		5	80x10, (redondos1)	21.99	19.79	19.79
		6	90x10, (redondos1)	25.13	22.62	22.62
		7	60x10, (redondos1)	15.71	14.14	14.14
		8	100x10, (redondos1)	28.27	25.45	25.45

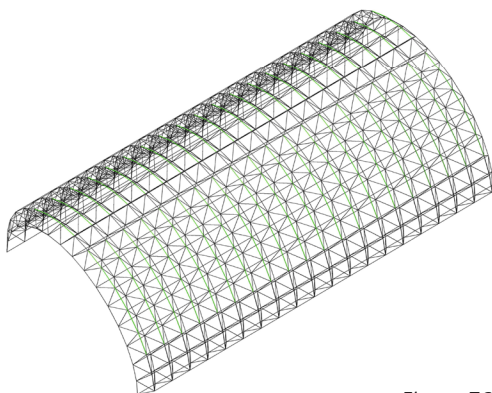
•Figura 74.

En este caso, para conseguir el máximo rendimiento de la estructura se opta por la utilización de ocho tipo de perfiles tubulares de acero laminado. El tipo de perfil más utilizado es un perfil de 80mm de diámetro con un espesor de chapa de 10mm.

Acero laminado: Medición de las superficies			
Serie	Perfil	Longitud (m)	Superficie (m ²)
redondos1	100x12.5	21502	6755
	120x12.5	91335	34432
	150x10	9223	4346
	120x100	45627	17201
	80x10	3988016	1002298
	90x10	217654	61540
	60x10	936316	176491
	100x10	101894	32011
	Total		1335075

•Figura 75.

Los perfiles de mayor diámetro son colocados en aquellas zonas de la estructura que necesitan absorber mayores esfuerzos.



•Figura 76.

En este caso las barras con mayor diámetro son las que forman los cordones superiores que recorren la estructura transversalmente y unen los dos apoyos que están en la misma línea pero en lados opuestos. Estas barras van desde los 80mm de diámetro hasta los 150mm en la parte central de estos cordones.

-Nudos y apoyos:

Todos los perfiles de esta estructura están unidos a través de nudos articulados materializados como nudo tipo MERO. De esta manera las barras sólo se transmiten esfuerzo axial pudiendo reducir considerablemente sus diámetros.

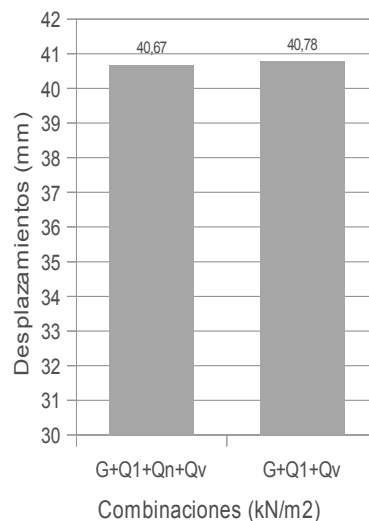
Al ser una estructura con forma de bóveda se opta por

apoyarla a lo largo de las dos líneas de nudos en contacto con el terreno. De esta manera, la estructura sólo tiene que salvar la distancia pequeña, unos 30m. El problema de salvar los 60m de luz en una dirección queda solucionado haciendo que sea fácil cumplir una restricción de un L/500 para una luz de 30m.

-Cargas y deformaciones:

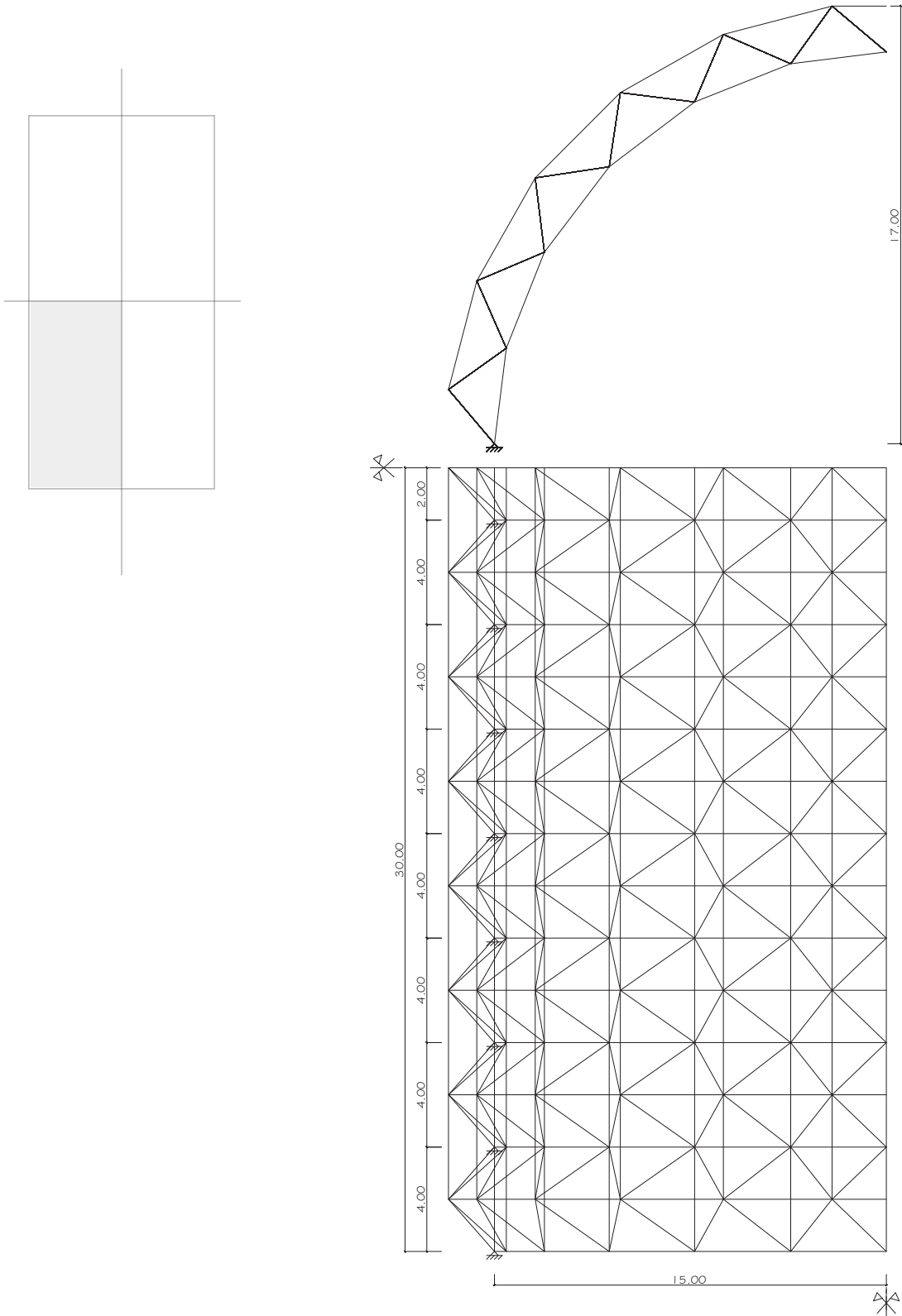
En cuanto a las cargas, se ha decidido colocar las cargas puntuales en cada nudo para simplificar el proceso, entendiéndose que de una manera más precisa deberían cargarse las barras en la dirección correspondiente y con sus longitudes reales.

Se ha comprobado que la peor combinación para la estructura es la peso propio + uso + viento (succión) ya que la succión producida por el viento es la carga más grande de todas intentando desplazar la estructura hacia arriba. Pero, en comparación con la malla plana, este tipo de estructura no presenta tanta diferencia de deformación al tener en cuenta la carga variable de nieve.



•Figura 77.

C2.2.3: ESQUEMAS GRÁFICOS DE IDEALIZACIÓN DE LA ESTRUCTURA

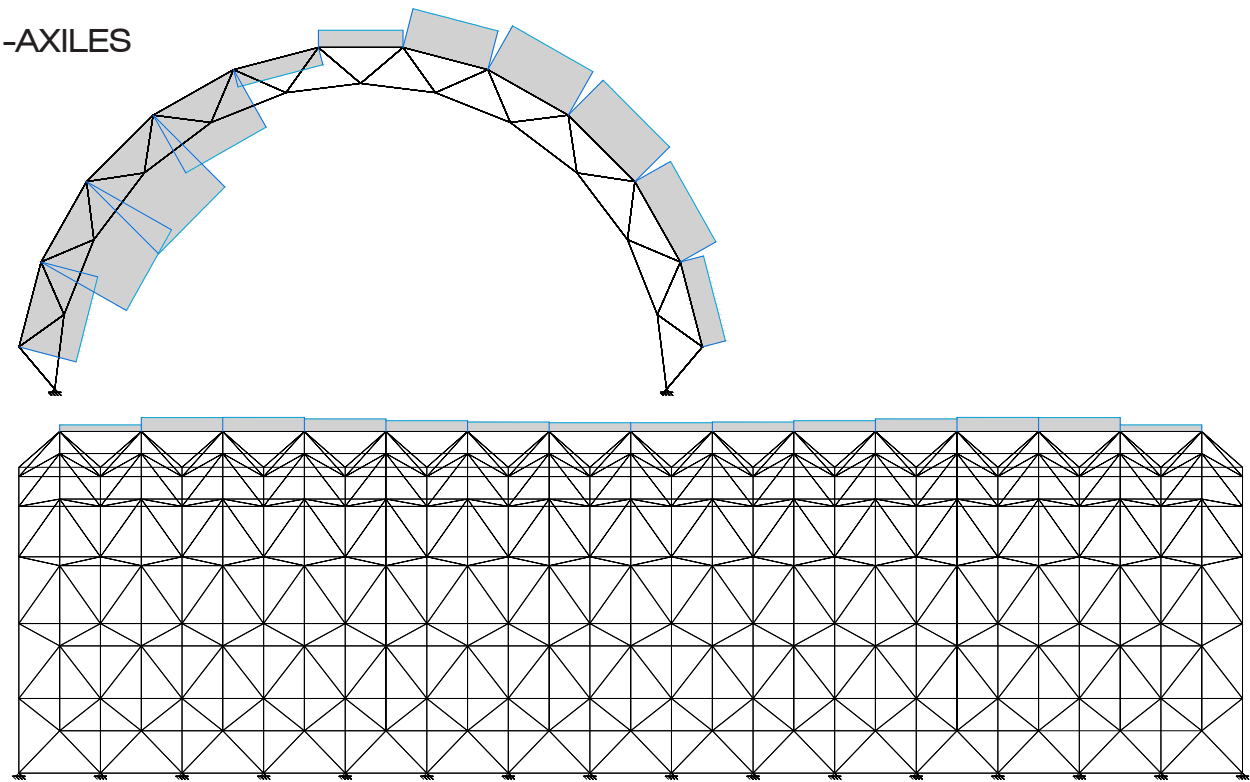


CARACTERISTICAS MALLA CILINDRICA 4X4				
Dimensión: 12x15 módulos		Superficie: 30mx60m	Módulo: 4x4m	Canto: 2m
Apoyada a lo largo de los dos bordes			Apoyo: articulación	
Deformación	G+Quso+Qnieve+Qviento= 40,67 mm < L/250			
	G+Quso+Qviento= 40,78 mm < L/250			
Peso	51,17 Kg/m²			

•Figura 78.

C2.2.3: ESQUEMAS GRÁFICOS DE IDEALIZACIÓN DE LA ESTRUCTURA

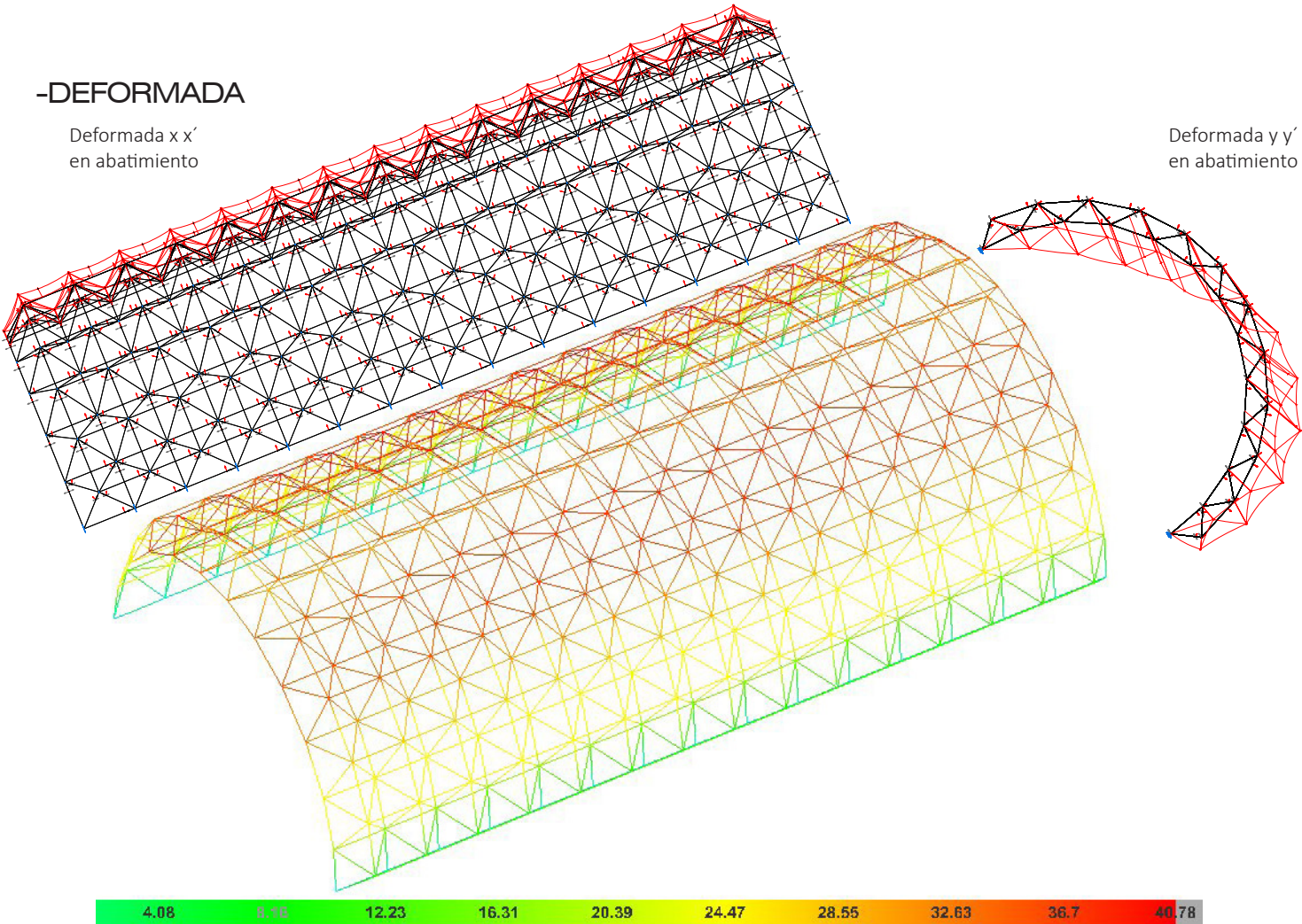
-AXILES



-DEFORMADA

Deformada x x' en abatimiento

Deformada y y' en abatimiento

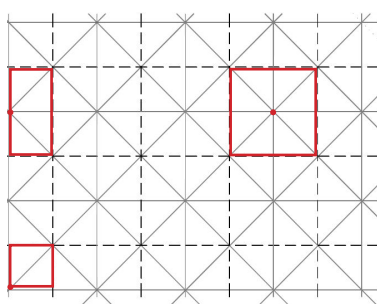


•Figura 79.

C2.3- MALLA CILÍNDRICA DE 5x5

C2.3.1- CÁLCULO DE ESFUERZOS

El siguiente modelo estructural es una malla cilíndrica de doble capa. Está compuesta de pirámides con base cuadrada de 5x5m y una altura hasta el vértice de 2m. Del mismo modo que las anteriores estructuras, lo primero a calcular son las fajas de carga por las que hay que multiplicar las cargas obtenidas en el apartado estimación de cargas. En este caso se trata de una malla con módulos de 5x5m por lo que sus fajas de carga serán las siguientes:



•Figura 80.

- Nudos centrales: $L_x=L_y= 5,00\text{m}$
- Nudos de borde: $L_x= 2,50\text{m}$ $L_y= 5,00\text{m}$
- Nudos de esquina: $L_x=L_y= 2,50\text{m}$

Estas son las fajas por las que tenemos que multiplicar cada tipo de carga para obtener unas cargas puntuales para aplicar en cada nudo.

De manera que las cargas finales que tenemos que aplicar a los nudos son las siguientes:

-Carga permanente: (0,062 kN/m²)

- Nudos centrales: 1,55 kN
- Nudos de borde: 0,78 kN
- Nudos de esquina: 0,39 kN

-Sobrecarga de uso: (0,40 kN/m²)

- Nudos centrales: 10,00 kN
- Nudos de borde: 5,00 kN
- Nudos de esquina: 2,50 kN

-Sobrecarga de nieve: (0,30kN/m²)W

- Nudos centrales: 7,50 kN
- Nudos de borde: 3,75 kN
- Nudos de esquina: 1,87kN

-Sobrecarga de viento: ($q_e=q_b \cdot c_e \cdot c_p$)

Como ya mencionamos anteriormente sabemos que el valor $q_b= 0,52 \text{ kN/m}^2$ pero nos falta por conocer otros valores. El coeficiente de exposición $c_e= 3,4$ al ser 17m la altura máxima de cubierta. Para calcular el coeficiente de presión c_p empleamos la tabla D.12 del DB- SE-AE (cubiertas cilíndricas). Aplicando los esquemas resulta una relación de $f/d= 17/30= 0,56$ y $g/d= 0$, por lo que tendremos de coeficiente de presión exterior:

- Zona A: 0,85 (presión)
- Zona B: -1,20 (succión)
- Zona C: -0,40 (succión)

Con estos datos se calcula la presión estática q_e , ($q_e=q_b \times c_e \times c_p$), que variará según la zona en la que nos encontremos:

- Zona A: $q_e= 0,52 \times 3,40 \times 0,85 = 1,50 \text{ kN/m}^2$
- Zona B: $q_e= 0,52 \times 3,40 \times (-1,20) = -2,12 \text{ kN/m}^2$
- Zona C: $q_e= 0,52 \times 3,40 \times (-0,40) = -0,71 \text{ kN/m}^2$

Estos valores son de presión o succión en el exterior. Al tratarse de una superficie cilíndrica no se considera una construcción diáfana por lo que no se calculan las presiones en el interior.

TABLA CARGAS FINALES MALLA CILÍNDRICA 5X5						
CARGAS (kN)	G	Quso	Qnieve	Qviento		
				A	B	C
Centrales	1,55	10,00	7,50	-	-53,00	-
Borde	0,78	5,00	3,75	18,75	-	-8,88
Esquinas	0,39	2,50	1,88	9,38	-	-4,44

•Figura 81.

C2.3.2: DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA

Esta estructura consiste en una malla espacial cilíndrica de doble capa formada por módulos de semioctaedros. Estos semioctaedros tienen una base de 5x5m y una altura de 2m ligados unos a otros formando dos capas iguales pero compensadas entre sí para poder cubrir una superficie total de 30x60m.

-Perfiles:

Esta estructura está formada por perfiles tubulares de acero laminado S275JR. Se han elegido perfiles redondos debido a que solamente trabajarán bajo esfuerzos de axil (tracción o compresión) y no necesita inercia para soportar ningún momento.

Características mecánicas								
Material		Ref.	Descripción	A (cm ²)	Avy (cm ²)	Avz (cm ²)	Iyy (cm ⁴)	Izz (cm ⁴)
Tipo	Designación							It (cm ⁴)
Acero laminado	S275	1	150x10, (redondos1)	43.98	39.58	39.58	1083.06	1083.06
		2	150x12.5, (redondos1)	54.00	48.60	48.60	1286.63	1286.63
		3	100x10, (redondos1)	28.27	25.45	25.45	289.81	289.81
		4	80x10, (redondos1)	21.99	19.79	19.79	137.44	137.44
		5	120x12.5, (redondos1)	42.22	37.99	37.99	618.06	618.06
		6	90x10, (redondos1)	25.13	22.62	22.62	204.20	204.20
		7	60x10, (redondos1)	15.71	14.14	14.14	51.05	51.05

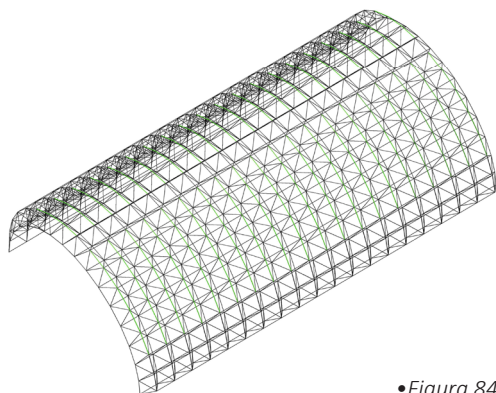
•Figura 82.

En este caso, para conseguir el máximo rendimiento de la estructura se opta por la utilización de ocho tipo de perfiles tubulares de acero laminado. El tipo de perfil más utilizado es un perfil de 80mm de diámetro con un espesor de chapa de 10mm.

Acero laminado: Medición de las superficies			
Serie	Perfil	Longitud (m)	Superficie (m ²)
redondos1	150x10	74295	35011
	150x12.5	43656	20572
	100x10	1277063	401201
	80x10	1924013	483557
	120x12.5	75346	28405
	90x10	554985	156918
	60x10	347679	65536
Total			1191200

•Figura 83.

Los perfiles de mayor diámetro son colocados en aquellas zonas de la estructura que necesitan absorber mayores esfuerzos.



•Figura 84.

En este caso las barras con mayor diámetro son las que forman los cordones superiores que recorren la estructura transversalmente y unen los dos apoyos que están en la misma línea pero en lados opuestos. Estas barras van desde los 80mm de diámetro hasta los 150mm en la parte central de estos cordones.

-Nudos y apoyos:

Todos los perfiles de esta estructura están unidos a través de nudos articulados materializados como nudo tipo MERO. De esta manera las barras sólo se transmiten esfuerzo axial pudiendo reducir considerablemente sus diámetros.

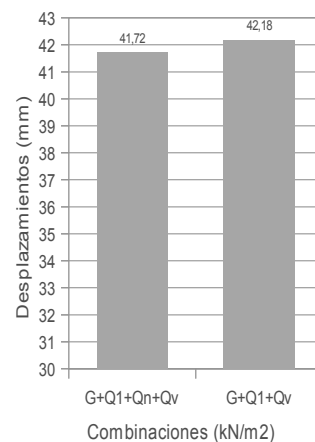
Al ser una estructura con forma de bóveda se opta por

apoyarla a lo largo de las dos líneas de nudos en contacto con el terreno. De esta manera, la estructura sólo tiene que salvar 30m de luz. El problema de salvar los 60m de luz en una dirección queda solucionado haciendo que sea fácil cumplir una restricción de un L/500 para una luz de 30m.

-Cargas y deformaciones:

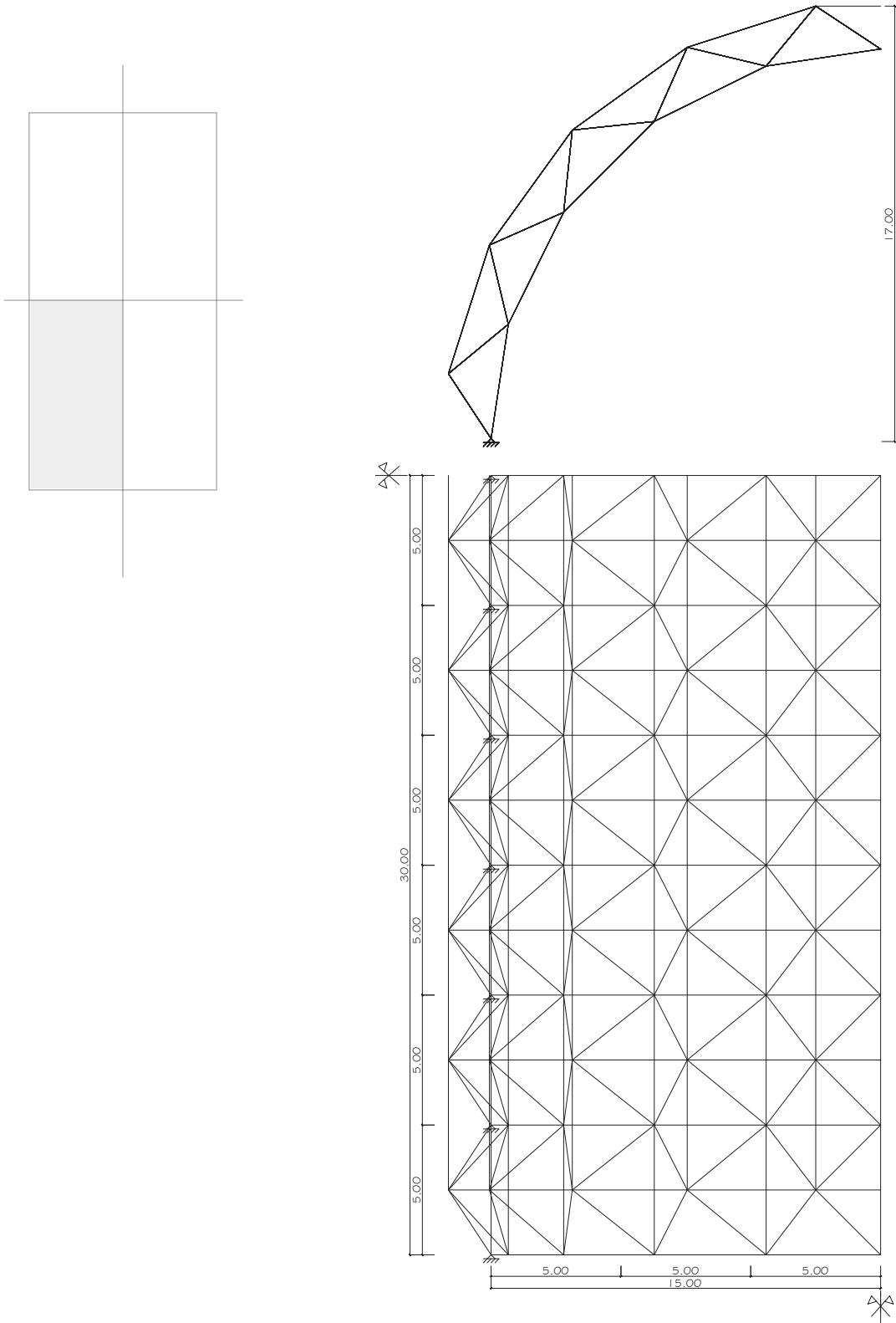
En cuanto a las cargas, se ha decidido colocar las cargas puntuales en cada nudo para simplificar el proceso, entendiendo que de una manera más precisa deberían cargarse las barras en la dirección correspondiente y con sus longitudes reales.

Se ha comprobado que la peor combinación para la estructura es la peso propio + uso + viento (succión) ya que la succión producida por el viento es la carga más grande de todas intentando desplazar la estructura hacia arriba. Pero este tipo de estructura no presenta tanta diferencia de deformación al tener en cuenta la carga variable de nieve respecto a la malla plana.



•Figura 85.

C2.3.3: ESQUEMAS GRÁFICOS DE IDEALIZACIÓN DE LA ESTRUCTURA

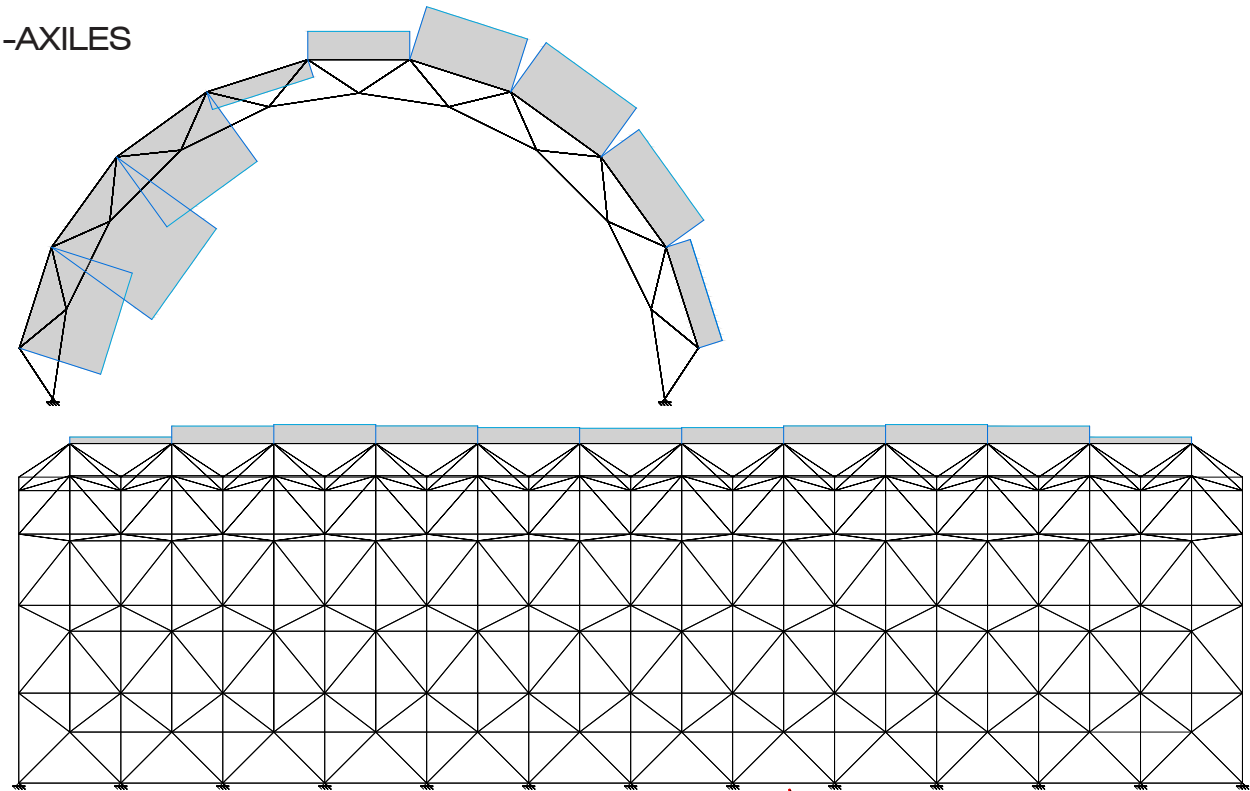


CARACTERÍSTICAS MALLA CILÍNDRICA 5X5				
Dimensión: 10x12 módulos		Superficie: 30mx60m	Módulo: 5x5m	Canto: 2m
Apoyada a lo largo de los dos bordes			Apoyo: articulación	
Deformación	G+Quso+Qnieve+Qviento= 41,72mm < L/250			
	G+Quso+Qviento= 42,18mm < L/250			
Peso	46,50 Kg/m²			

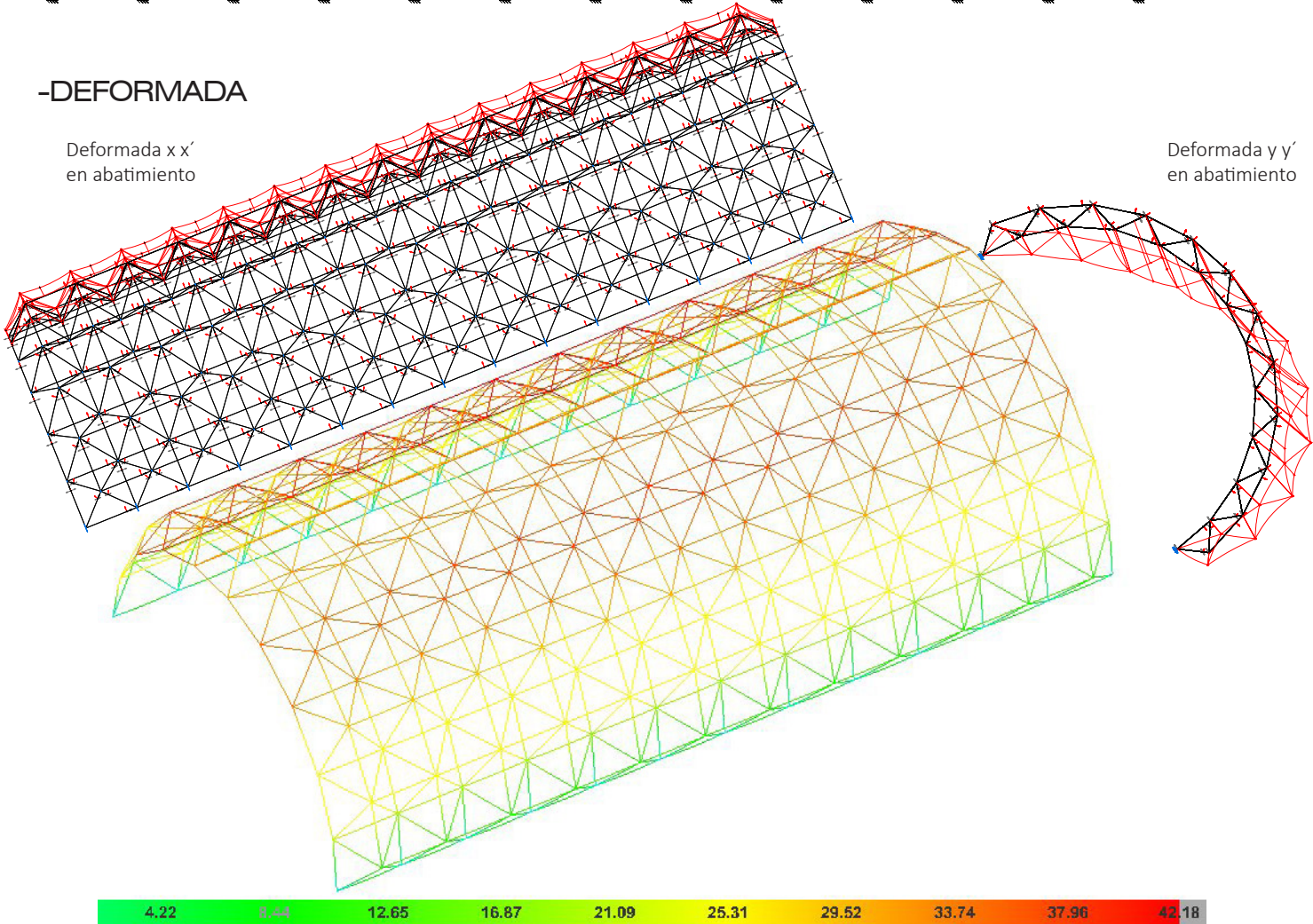
•Figura 86.

C2.3.3: ESQUEMAS GRÁFICOS DE IDEALIZACIÓN DE LA ESTRUCTURA

-AXILES



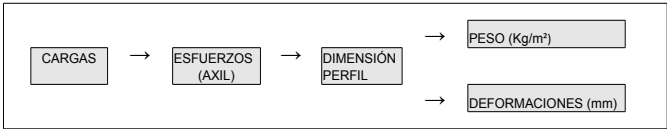
-DEFORMADA



•Figura 87.

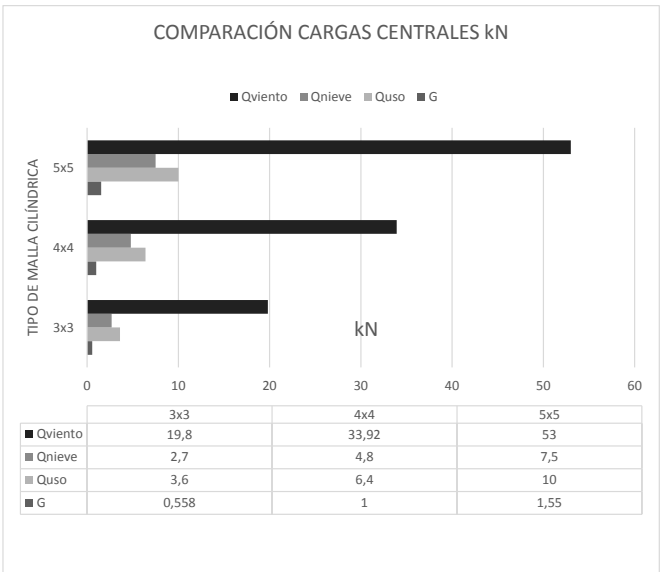
C2.4: COMPARACIÓN ENTRE LAS MALLAS CILÍNDRICAS

Los estudios anteriores sobre los tres tipos de módulos (3x3, 4x4, 5x5) de malla cilíndrica de doble capa se han realizado para poder determinar cuál es la mejor dimensión del módulo base semioctaédrico que mejor funciona para cubrir una superficie de 30x60m. Para ello nos centraremos en los datos obtenidos anteriormente para poder compararlos y analizarnos intentando llegar a la estructura cilíndrica que mejor responda a esta dimensión de superficie adaptándose a las necesidades que necesita un programa deportivo.



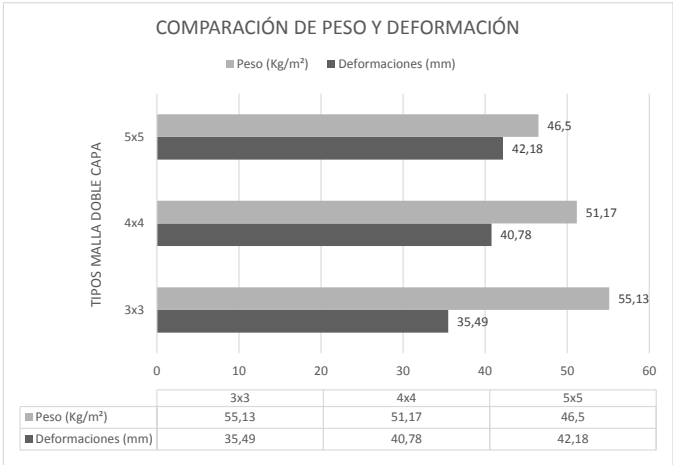
•Figura 88.

Comenzamos este estudio del mismo modo que empezamos cada apartado de cada uno de los tres tipos de estructura; las cargas a aplicar. Como ya observamos, todas las cargas (permanentes o variables) por metro cuadrado son las mismas en las tres estructuras. La diferencia está que al variar la dimensión de la base del semioctaedro cambia la faja de carga por la que hay que multiplicar cada una de las cargas anteriores. De este modo mayor dimensión del módulo mayor faja de carga y por lo tanto mayor carga a aplicar en los nudos.



•Figura 89.

En este gráfico se puede comprobar como aumenta la carga aumentando la dimensión del módulo siendo la carga variable de viento la más perjudicada. Todo esto nos lleva a que necesitaremos perfiles de mayor diámetro para soportar cargas mayores. De esta manera, la estructura de módulo 5x5 necesitará mayores perfiles para absorber estas grandes cargas pero también tendrá más fácil la cumplimiento de la solicitud a pandeo al hablar de longitudes sobre unos cinco metros. Será el número y tipo de perfil a emplear quienes determinen el peso de la estructura y de alguna manera su deformación (esfuerzos y perfiles). En contradicción con la tipología plana, es la malla cilíndrica de módulo de 5x5 la que pesa bastante menos que la del módulo de 3x3 (46,50Kg/m² frente a los 55,13Kg/m²) porque los diámetros son relativamente mayores y el menor número de barras tiene gran peso. Pero aunque el peso sea menor es la malla cilíndrica de módulo 3x3 la que sufre menos deformaciones.



•Figura 90.

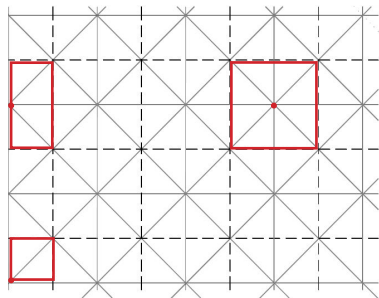
En este caso no hay ningún módulo que funcione mejor que los demás en peso y en deformación. Si lo que queremos es una estructura más económica nos quedaríamos con el módulo de 5x5 pero si lo que nos interesa es que nuestra cubierta sufra la mínima deformación sería el módulo 3x3m el ganador. En mi opinión, me quedaría con la malla cilíndrica de 4x4m ya que es la que presenta el mejor equilibrio entre peso y deformación. Su peso (51,17Kg/m²) y su deformación (40,78mm) ocupan los valores medios en la tabla obteniendo la mejor relación de precio y optimización.

C3: CÁLCULO MALLA VAÍDA

C3.1- MALLA VAÍDA DE 3x3

C3.1.1- CÁLCULO DE ESFUERZOS

El siguiente modelo estructural es una malla vaída de doble capa. Está compuesta de semioctaedros con base cuadrada de 3x3m y una distancia hasta el vértice de 2m. De la misma manera que hicimos con las mallas anteriores, lo primero a calcular son las fajas de carga por las que hay que multiplicar las cargas obtenidas en el apartado de estimación de cargas. En este caso se trata de una malla con módulos de 3x3m por lo que sus fajas de carga serán las siguientes:



•Figura 91.

- Nudos centrales: $L_x=L_y= 3,00\text{m}$
- Nudos de borde: $L_x= 1,50\text{m}$ $L_y= 3,00\text{m}$
- Nudos de esquina: $L_x=L_y= 1,50\text{m}$

Estas son las fajas por las que tenemos que multiplicar cada tipo de carga para obtener unas cargas puntuales para aplicar en cada nudo.

De manera que las cargas finales que tenemos que aplicar a los nudos son las siguientes:

-Carga permanente: (0,062 kN/m²)

- Nudos centrales: 0,558 kN
- Nudos de borde: 0,279 kN
- Nudos de esquina: 0,140 kN

-Sobrecarga de uso: (0,40 kN/m²)

- Nudos centrales: 3,60 kN
- Nudos de borde: 1,80 kN
- Nudos de esquina: 0,90 kN

-Sobrecarga de nieve: (0,30kN/m²)W

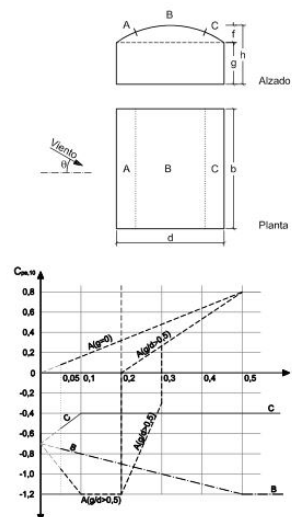
- Nudos centrales: 2,70 kN
- Nudos de borde: 1,35 kN
- Nudos de esquina: 0,68kN

-Sobrecarga de viento: ($q_e=q_b \cdot c_e \cdot c_p$)

Como ya mencionamos anteriormente sabemos que el valor $q_b= 0,52 \text{ kN/m}^2$ pero nos falta por conocer otros valores. El coeficiente de exposición $c_e= 3,63$ al ser 27,65m la altura máxima de cubierta. Como en el Código Técnico no existe ningún anejo destinado al cálculo de viento para cubiertas esféricas utilizaremos la tabla D.12 del DB- SE-AE (cubiertas cilíndricas) para calcular el coeficiente de presión c_p . Aplicando los esquemas resulta una relación de $f/d= 27,65/30= 0,92$, y $g/d= 0$, por lo que tendremos de coeficiente de presión exterior:

- Zona A: 1,00 (presión)
- Zona B: -1,20 (succión)
- Zona C: -0,40 (succión)

Tabla D.12 Cubiertas cilíndricas



Notas:

- Para $0 < g/d < 0,5$, el coeficiente de presión exterior, $c_{pe,10}$, correspondiente a la superficie A, se obtendrá mediante interpolación lineal.
- Para $0,2 \leq f/d \leq 0,3$ y $g/d \geq 0,5$, se adoptará el más desfavorable de los dos posibles valores del coeficiente de presión exterior, $c_{pe,10}$, correspondiente a la zona A.

•Figura 92.

Con estos datos se calcula la presión estática q_e , ($q_e= q_b \times c_e \times c_p$), que variará según la zona en la que nos encontremos:

- Zona A: $q_e= 0,52 \times 3,63 \times 1 = 1,89 \text{ kN/m}^2$
- Zona B: $q_e= 0,52 \times 3,63 \times (-1,20) = -2,27 \text{ kN/m}^2$
- Zona C: $q_e= 0,52 \times 3,63 \times (-0,40) = -0,75 \text{ kN/m}^2$

Estos valores son de presión o succión en el exterior. Al tratarse de una construcción diáfana que presenta grandes huecos, la acción de viento genera, además de presiones en el exterior, presiones en el interior, que se suman a las anteriores.

Tabla 3.6 Coeficientes de presión interior												
Esbeltez en el plano paralelo al viento	Área de huecos en zonas de succión respecto al área total de huecos del edificio											
	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	
≤1	0,7	0,7	0,6	0,4	0,3	0,1	0,0	-0,1	-0,3	-0,4	-0,5	
≥4	0,5	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0,0	-0,1	-0,2	-0,3	-0,3	

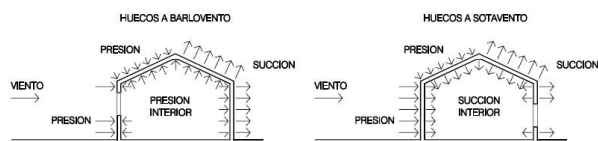


Fig. 3.1 Presiones ejercidas por el viento en una construcción diáfana

•Figura 93.

La esbeltez tiene un valor de **0,24** (12/50) y la relación entre el área de huecos en zonas de succión y el área de huecos total del edificio es de **1** (al existir un hueco de iguales dimensiones en cada fachada simétrica del edificio, es decir, en el lado de 30m un hueco de 143,20 m², y en el de 60m de 230,70 m². De esta forma nos quedamos con un valor de succión interior de **-0,50 kN/m²**. Este valor habría que añadirse al resultado anterior de cada zona, sin embargo para simplificar el cálculo, sólo nos quedaremos con el valor más desfavorable, el de la zona B, aplicando este resultado a todos los nudos de la estructura. Por lo tanto: $-2,27 + (-0,50) = -2,77 \text{ kN/m}^2$.

Multiplicando estas cargas por sus correspondientes fajas se obtiene como resultado final:

TABLA CARGAS FINALES MALLA VAÍDA 3X3						
CARGAS (kN)	G	Quso	Qnieve	Qviento		
				A	B	C
Centrales	0,56	3,60	2,70	-	-19,08	-
Borde	0,28	1,80	1,35	8,51	-	-3,20
Esquinas	0,14	0,90	0,68	4,25	-	-1,60

•Figura 94.

C3.1.2: DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA

Esta estructura consiste en una malla espacial vahida de doble capa formada por módulos de semioctaedros. Estos semioctaedros tienen una base de 3x3m y una altura de 2m ligados unos a otros formando dos capas iguales pero compensadas entre sí para poder cubrir una superficie total de 30x60m.

-Perfiles:

Esta estructura está formada por perfiles tubulares de acero laminado S275JR. Se han elegido perfiles tubulares redondos debido a que trabajan muy bien a axil (tracción o compresión) y no necesitan inercia para soportar ningún momento.

Características mecánicas									
Material	Ref.	Descripción	A (cm ²)	Avy (cm ²)	Avz (cm ²)	Iyy (cm ⁴)	Izz (cm ⁴)	It (cm ⁴)	
Tipo	Designación								
Acero laminado	S275	1 70x10, (redondos)	18.85	16.96	16.96	87.18	87.18	174.36	
		2 80x10, (redondos)	21.99	19.79	19.79	137.44	137.44	274.89	
		3 90x10, (redondos)	25.13	22.62	22.62	204.20	204.20	408.41	
		4 60x10, (redondos)	15.71	14.14	14.14	51.05	51.05	102.10	
		5 100x10, (redondos)	28.27	25.45	25.45	289.81	289.81	579.62	
		6 120x100, (redondos)	34.56	31.20	31.20	527.00	527.00	1054.00	
		7 150x10, (redondos)	43.98	39.58	39.58	1083.06	1083.06	2166.13	
		8 60x12.5, (redondos)	18.65	16.79	16.79	56.25	56.25	112.50	
		9 120x12.5, (redondos)	42.22	37.99	37.99	618.06	618.06	1236.11	
		10 100x12.5, (redondos)	34.36	30.93	30.93	335.56	335.56	671.12	

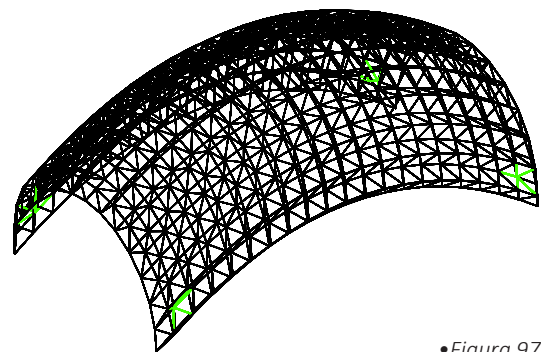
•Figura 95.

En este caso, como la estructura tiene doble curvatura es más estable por sí misma que una malla plana o cilíndrica. Para conseguir su mayor optimización estructural se emplean unos diez tipos de perfil. El tipo de perfil más utilizado es un perfil de 70mm de diámetro con un espesor de chapa de 10mm.

Acero laminado: Medición de las superficies			
Serie	Perfil	Longitud (m)	Superficie (m ²)
redondos	70x10	3561149	783138
	80x10	809076	203343
	90x10	137177	38786
	60x10	2498667	470988
	100x10	84607	26580
	120x100	48868	18423
	150x10	10663	5025
	60x12.5	73299	13817
	120x12.5	10827	4082
	100x12.5	30014	9429
Total			1573609

•Figura 96.

En este caso, los perfiles de gran diámetro son escasos debido a la estabilidad propia de la estructura y son colocados en los módulos que sirven de apoyos.



•Figura 97.

Estas barras van desde los 80mm de diámetro hasta los 120mm en la parte central de estos cordones.

-Nudos y apoyos:

Todos los perfiles de esta estructura están unidos a través de nudos articulados materializados como nudo tipo MERO. De esta manera las barras sólo se transmiten esfuerzo axil pudiendo reducir considerablemente sus diámetros.

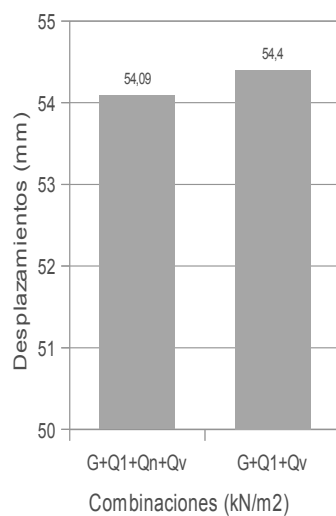
Al ser una estructura con forma esférica se opta por apo-

arla en los módulos situados en las esquinas. En cada esquina la estructura se apoya en cuatro puntos para repartir lo mejor posible las cargas al terreno y poder reducir el diámetro de los perfiles. De esta manera, la estructura tiene que salvar la longitud más larga de la superficie a cubrir; unos 60m. Aún así, la estructura cumple fácilmente la restricción de un $L/500$ para una luz de 60m.

-Cargas y deformaciones:

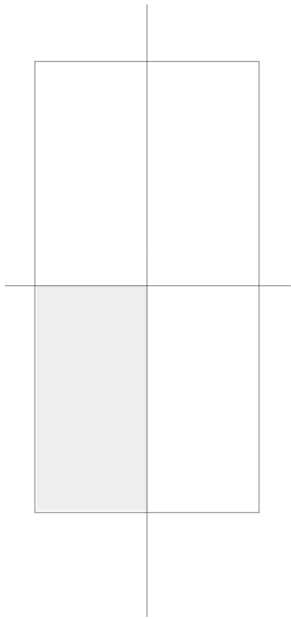
En cuanto a las cargas, se ha decidido colocar las cargas puntuales en cada nudo para simplificar el proceso, entendiendo que de una manera más precisa deberían cargarse las barras en la dirección correspondiente y con sus longitudes reales.

Se ha comprobado que la peor combinación para la estructura es la peso propio + uso + viento (succión) ya que la succión producida por el viento es la carga más grande de todas intentando desplazar la estructura hacia arriba. Pero en este tipo de estructura la diferencia de deformación es mínima al tener o no en cuenta la carga variable de nieve.



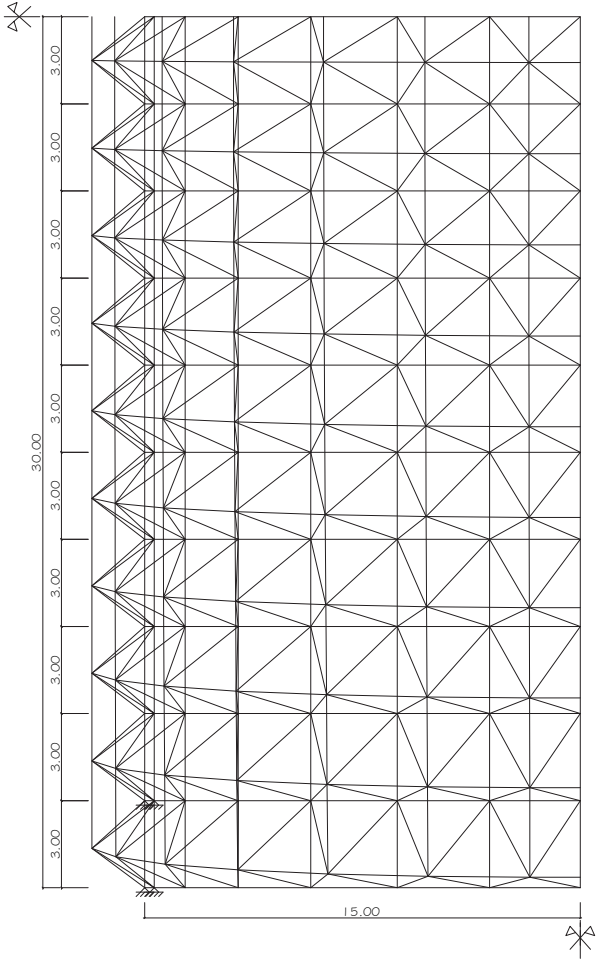
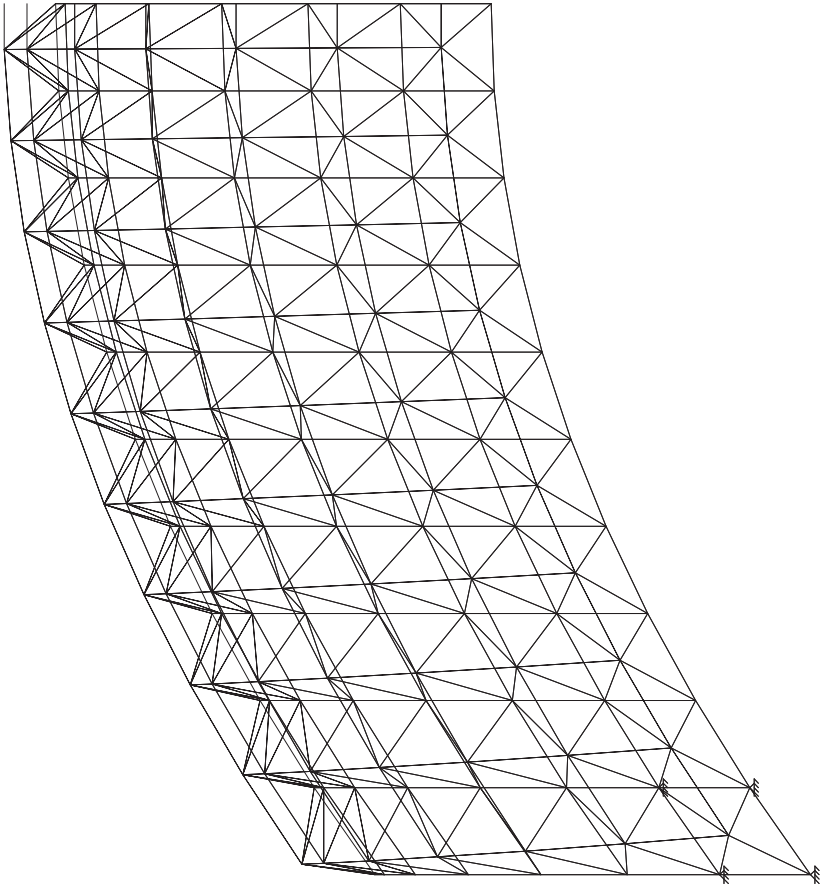
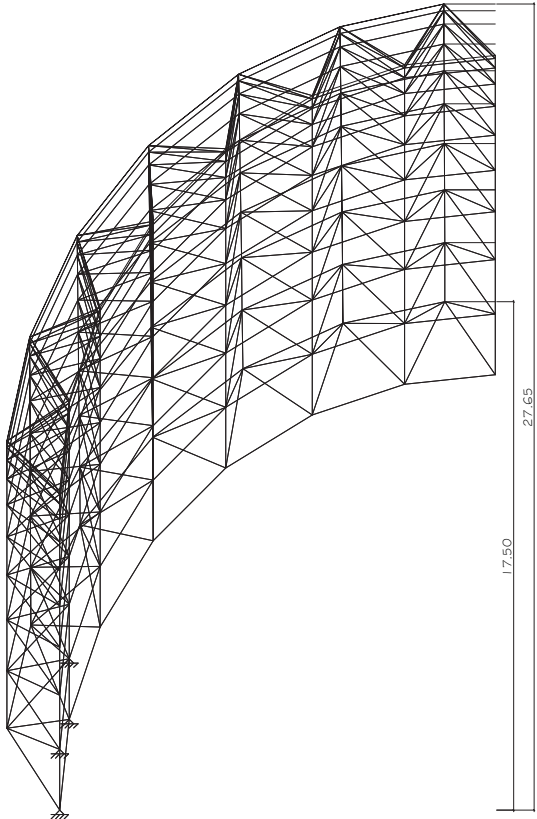
•Figura 98.

C3.1.3: ESQUEMAS GRÁFICOS DE IDEALIZACIÓN DE LA ESTRUCTURA



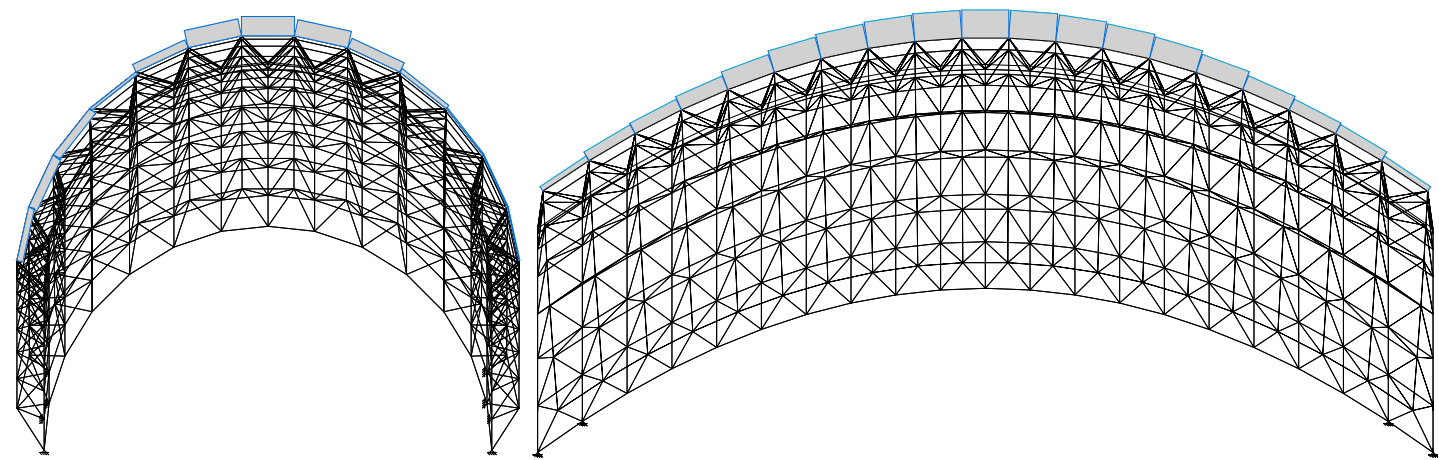
CARACTERISTICAS MALLA VAÍDA 3X3				
Dimensión: 14x20 módulos		Superficie: 30mx60m	Módulo:3x3m	Canto: 2m
Apoyada en cuatro puntos en cada esquina			Apoyo: articulación	
Deformación	G+Quso+Qnieve+Qviento= 54,09 mm < L/250			
	G+Quso+Qviento= 54,40 mm < L/250			
Peso	58,88 Kg/m²			

•Figura 99.



C3.1.3: ESQUEMAS GRÁFICOS DE IDEALIZACIÓN DE LA ESTRUCTURA

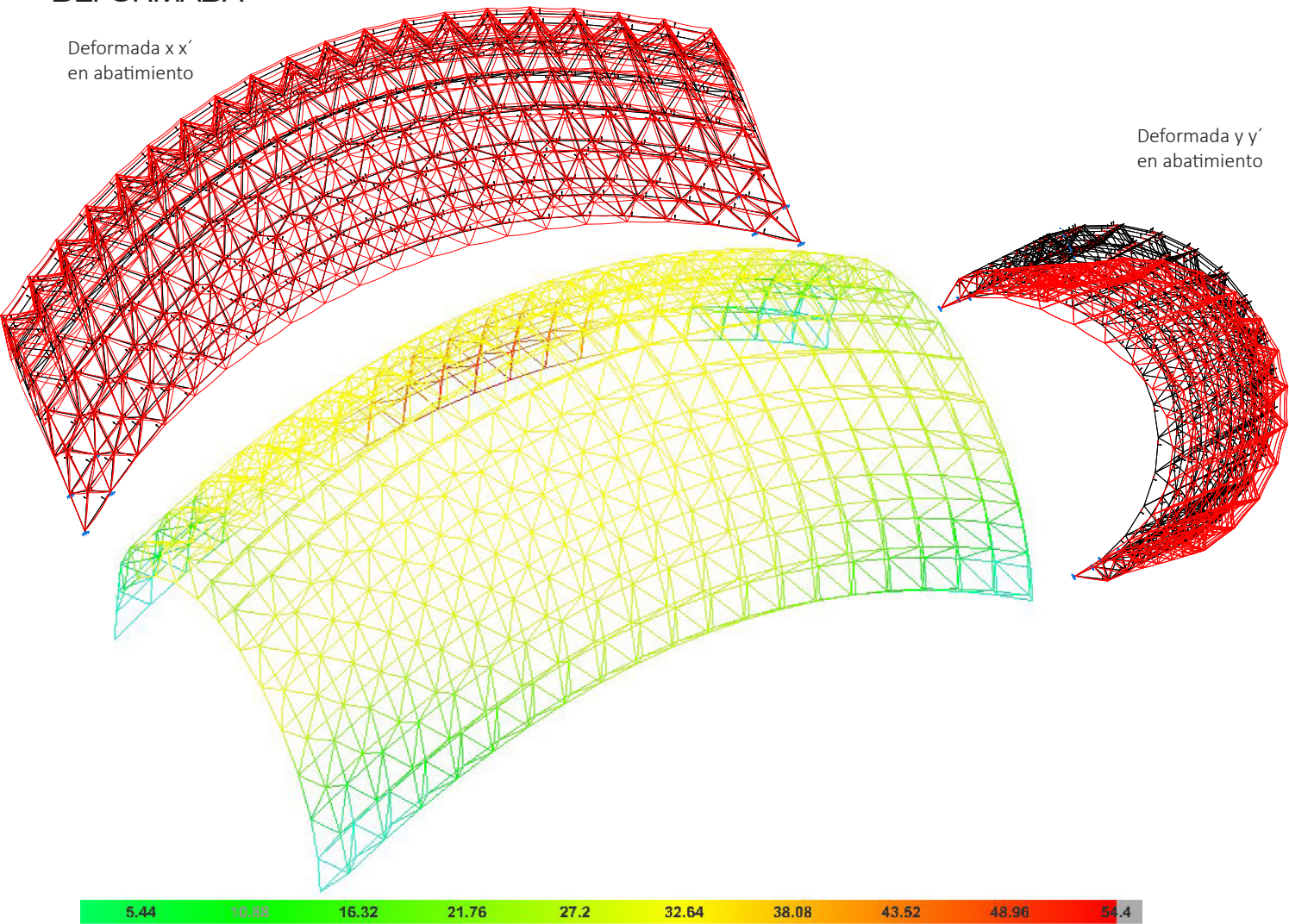
-AXILES



-DEFORMADA

Deformada x x' en abatimiento

Deformada y y' en abatimiento

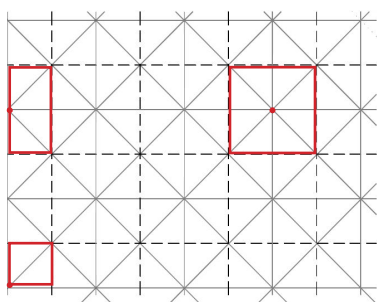


•Figura 100.

C3.2- MALLA VAÍDA DE 4x4

C3.2.1- CÁLCULO DE ESFUERZOS

El siguiente modelo estructural es una malla vahida de doble capa. Está compuesta de semioctaedros con base cuadrada de 4x4m y una distancia hasta el vértice de 2m. De la misma manera que hicimos con las mallas anteriores, lo primero a calcular son las fajas de carga por las que hay que multiplicar las cargas obtenidas en el apartado de estimación de cargas. En este caso se trata de una malla con módulos de 4x4m por lo que sus fajas de carga serán las siguientes:



•Figura 101.

- Nudos centrales: $L_x=L_y= 4,00\text{m}$
- Nudos de borde: $L_x= 2,00\text{m}$ $L_y= 4,00\text{m}$
- Nudos de esquina: $L_x=L_y= 2,00\text{m}$

Estas son las fajas por las que tenemos que multiplicar cada tipo de carga para obtener unas cargas puntuales para aplicar en cada nudo. De manera que las cargas finales que tenemos que aplicar a los nudos son las siguientes:

-Carga permanente: (0,062 kN/m²)

- Nudos centrales: 1,00 kN
- Nudos de borde: 0,50 kN
- Nudos de esquina: 0,25 kN

-Sobrecarga de uso: (0,40 kN/m²)

- Nudos centrales: 6,40 kN
- Nudos de borde: 3,20 kN
- Nudos de esquina: 1,60 kN

-Sobrecarga de nieve: (0,30kN/m²)W

- Nudos centrales: 4,80 kN
- Nudos de borde: 2,40 kN
- Nudos de esquina: 1,20kN

-Sobrecarga de viento: ($q_e=q_b \cdot c_e \cdot c_p$)

Como ya mencionamos anteriormente sabemos que el valor $q_b= 0,52 \text{ kN/m}^2$ pero nos falta por conocer otros valores. El coeficiente de exposición $c_e= 3,63$ al ser 27,65m la altura máxima de cubierta. Como en el Código Técnico no existe ningún anejo destinado al cálculo de viento para cubiertas esféricas utilizaremos la tabla D.12 del DB- SE-AE (cubiertas cilíndricas) para calcular el coeficiente de presión c_p . Aplicando los esquemas resulta una relación de $f/d= 27,65/30= 0,9$ y $g/d= 0$, por lo que tendremos de coeficiente de presión exterior:

- Zona A: 1,00 (presión)
- Zona B: -1,20 (succión)
- Zona C: -0,40 (succión)

Con estos datos se calcula la presión estática q_e , ($q_e= q_b \times c_e \times c_p$), que variará según la zona en la que nos encontremos:

- Zona A: $q_e= 0,52 \times 3,63 \times 1 = 1,89 \text{ kN/m}^2$
- Zona B: $q_e= 0,52 \times 3,63 \times (-1,20) = -2,27 \text{ kN/m}^2$
- Zona C: $q_e= 0,52 \times 3,63 \times (-0,40) = -0,75 \text{ kN/m}^2$

Estos valores son de presión o succión en el exterior. Al tratarse de una construcción diáfana que presenta grandes huecos, la acción de viento genera, además de presiones en el exterior, presiones en el interior, que se suman a las anteriores. Como ya están calculadas en la malla anterior sabemos que tenemos que sumar (-0,50 kN/m²) en la zona B que es la más perjudicada.

Multiplicando estas cargas por sus correspondientes fajas se obtiene como resultado final:

TABLA CARGAS FINALES MALLA VAÍDA 4X4						
CARGAS (kN)	G	Quso	Qnieve	Qviento		
				A	B	C
Centrales	1,00	6,40	4,80	-	-33,92	-
Borde	0,50	3,20	2,40	15,12	-	-5,68
Esquinas	0,25	1,60	1,20	7,56	-	-2,84

•Figura 102.

C3.2.2: DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA

Esta estructura consiste en una malla espacial vaída de doble capa formada por módulos de semioctaedros. Estos semioctaedros tienen una base de 4x4m y una altura de 2m ligados unos a otros formando dos capas iguales pero compensadas entre sí para poder cubrir una superficie total de 30x60m.

Esta estructura está formada por perfiles tubulares de acero laminado S275JR. Se han elegido perfiles tubulares redondos debido a que trabajan muy bien a axil (tracción o compresión) y no necesitan inercia para soportar ningún momento.

Características mecánicas							
Material	Ref.	Descripción	A (cm²)	Avy (cm²)	Avz (cm²)	Iyy (cm⁴)	Izz (cm⁴)
Tipo	Designación						It (cm⁴)
Acero laminado	S275	1 90X10, (redondos)	25.13	22.62	22.62	204.20	204.20
		2 120x100, (redondos)	34.56	31.20	31.20	527.00	527.00
		3 100x10, (redondos)	28.27	25.45	25.45	289.81	289.81
		4 100x12.5, (redondos)	34.36	30.93	30.93	335.56	335.56
		5 80X10, (redondos)	21.99	19.79	19.79	137.44	137.44
		6 60x10, (redondos)	15.71	14.14	14.14	51.05	51.05
		7 150x10, (redondos)	43.98	39.58	39.58	1083.06	1083.06
		8 150x12.5, (redondos)	54.00	48.60	48.60	1286.63	1286.63
		9 70x10, (redondos)	18.85	16.96	16.96	87.18	87.18
		10 120x12.5, (redondos)	42.22	37.99	37.99	618.06	618.06

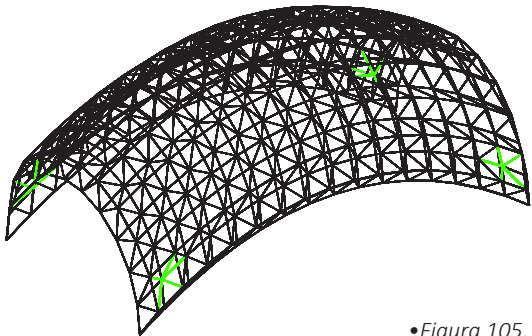
•Figura 103.

En este caso, como la estructura tiene doble curvatura es más estable por sí misma que una malla plana o cilíndrica. Para conseguir su mayor optimización estructural se emplean unos diez tipo de perfil. El tipo de perfil más utilizado es un perfil de 80mm de diámetro con un espesor de chapa de 10mm.

Acero laminado: Medición de las superficies			
Serie	Perfil	Longitud (m)	Superficie (m²)
redondos	90X10	1412872	399480
	120x100	85221	32128
	100x10	224838	70635
	100x12.5	60337	18956
	80X10	1990374	500236
	60x10	523656	98707
	150x10	61031	28760
	150x12.5	8730	4114
	70x10	1121915	246722
	120x12.5	36726	13845
Total			1413582

•Figura 104.

En este caso, los perfiles de gran diámetro son escasos debido a la estabilidad propia de la estructura y son colocados en los módulos que sirven de apoyos.



•Figura 105.

Estas barras van desde los 80mm de diámetro hasta los 150mm en la parte central de estos cordones.

-Nudos y apoyos:

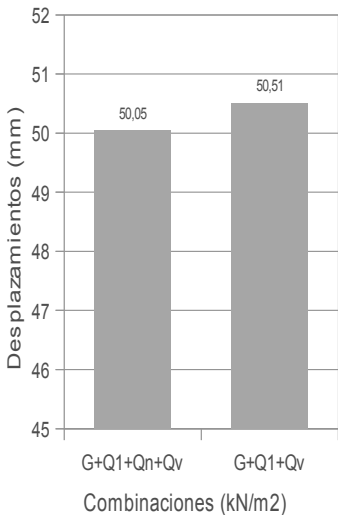
Todos los perfiles de esta estructura están unidos a través de nudos articulados materializados como nudo tipo MERO. De esta manera las barras sólo se transmiten esfuerzo axil pudiendo reducir considerablemente sus diámetros.

Al ser una estructura con forma esférica se opta por apoyarla en los módulos situados en las esquinas. En cada esquina la estructura se apoya en cuatro puntos para repartir lo mejor posible las cargas al terreno y poder reducir el diámetro de los perfiles. De esta manera, la estructura tiene que salvar la longitud más larga de la superficie a cubrir; unos 60m. Aún así, la estructura cumple fácilmente la restricción de un L/500 para una luz de 60m.

-Cargas y deformaciones:

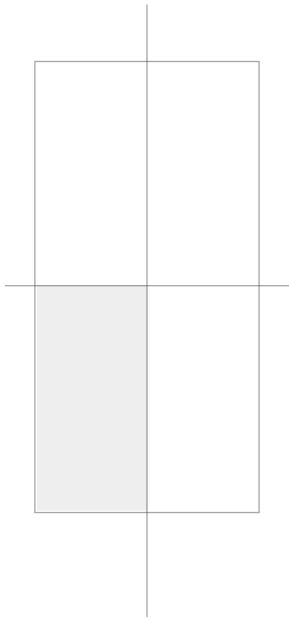
En cuanto a las cargas, se ha decidido colocar las cargas puntuales en cada nudo para simplificar el proceso, entendiéndose que de una manera más precisa deberían cargarse las barras en la dirección correspondiente y con sus longitudes reales.

Se ha comprobado que la peor combinación para la estructura es la peso propio + uso + viento (succión) ya que la succión producida por el viento es la carga más grande de todas intentando desplazar la estructura hacia arriba. Pero este tipo de estructura no presenta tanta diferencia de deformación al tener en cuenta la carga variable de nieve respecto a la malla plana.



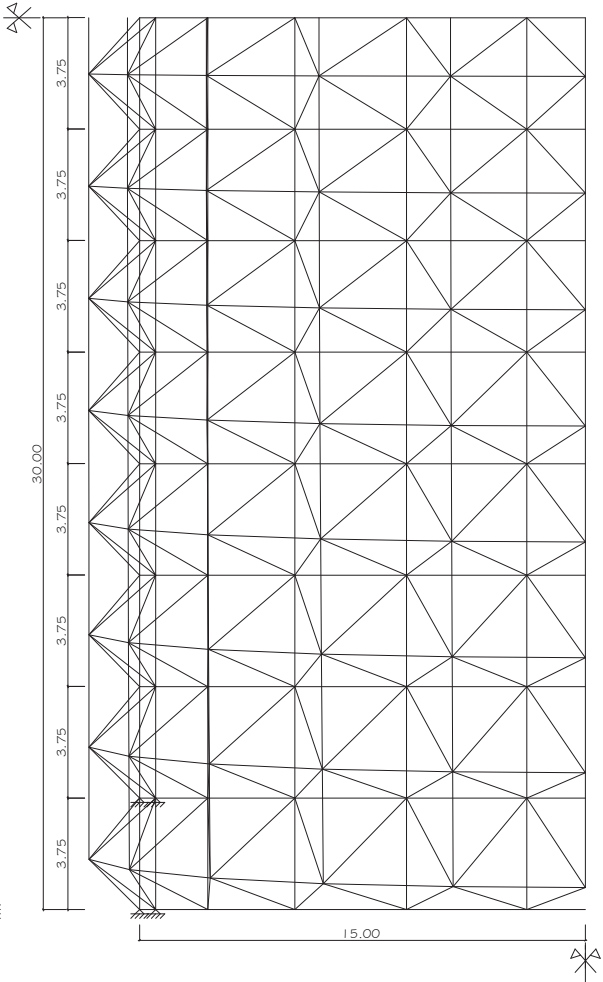
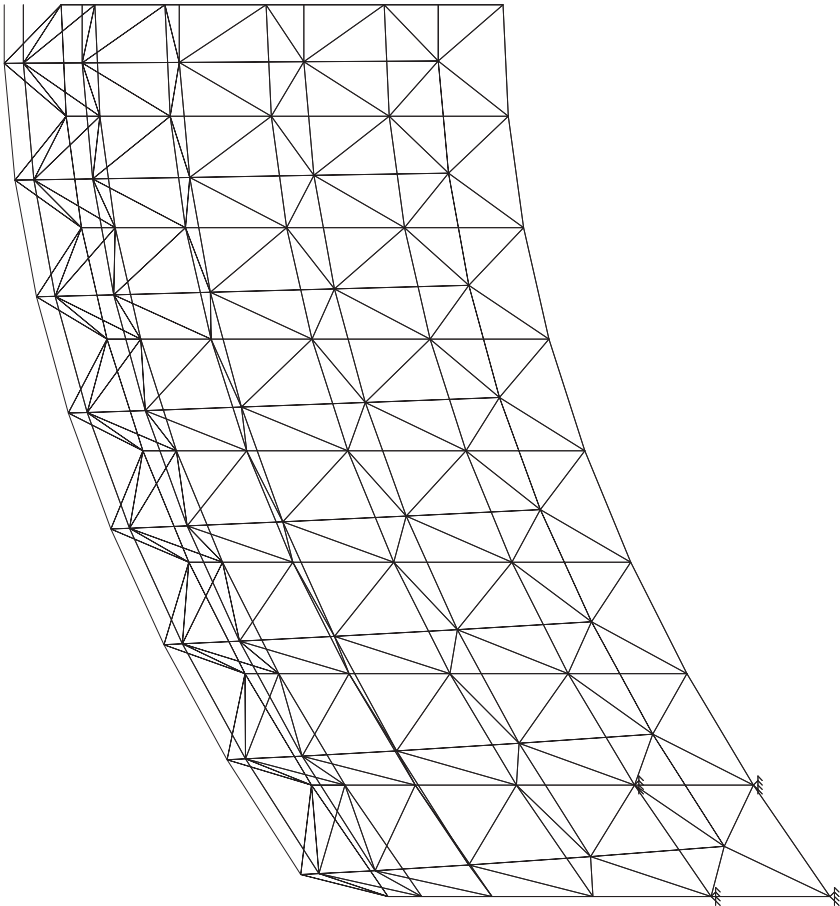
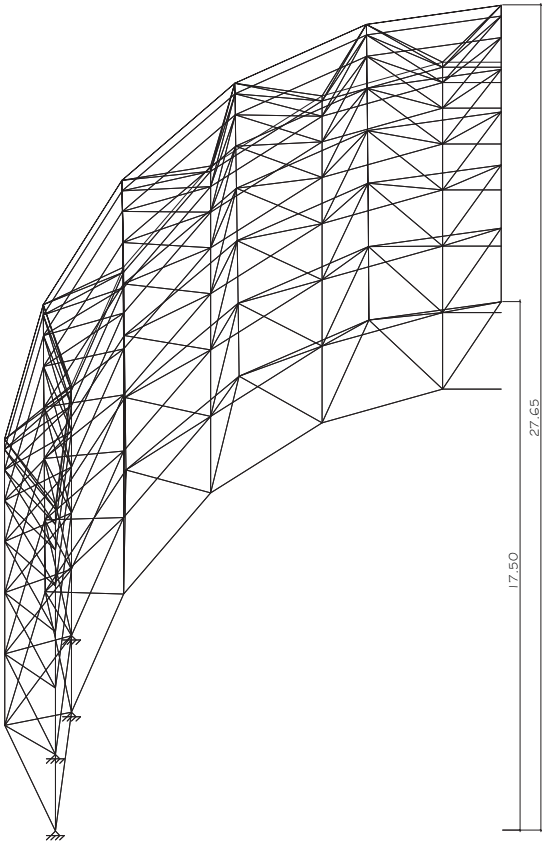
•Figura 106.

C3.2.3: ESQUEMAS GRÁFICOS DE IDEALIZACIÓN DE LA ESTRUCTURA



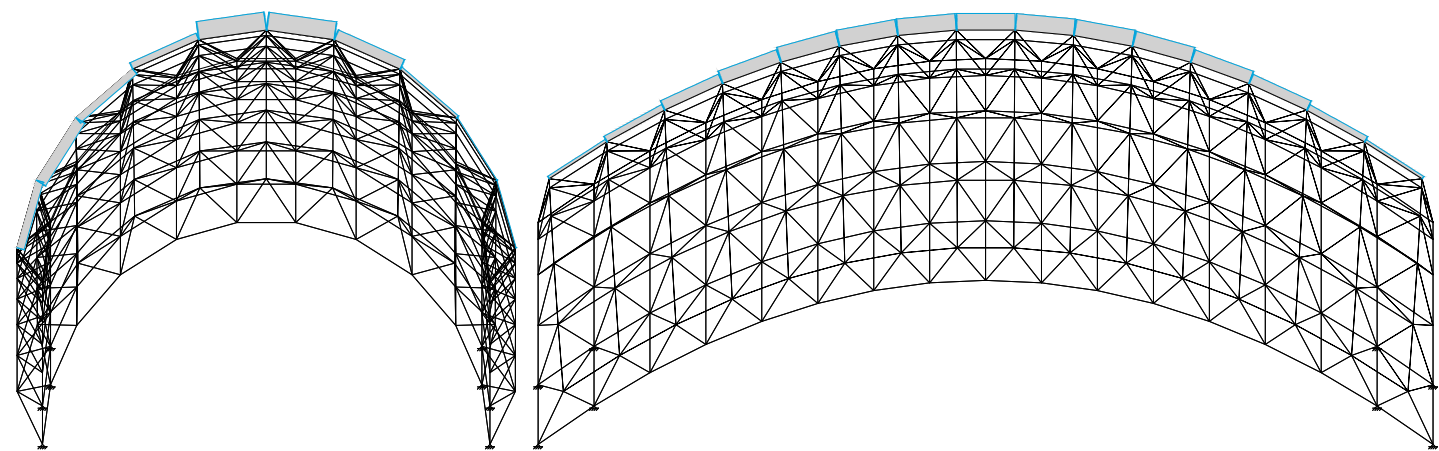
CARACTERÍSTICAS MALLA VAÍDA 4X4			
Dimensión: 11x16 módulos	Superficie: 30mx60m	Módulo: 4x4m	Canto: 2m
Apoyada en cuatro puntos en cada esquina	Apoyo: articulación		
Deformación	G+Quso+Qnieve+Qviento= 50,05 mm < L/250		
	G+Quso+Qviento= 50,51 mm < L/250		
Peso	54,40 Kg/m²		

•Figura 107.

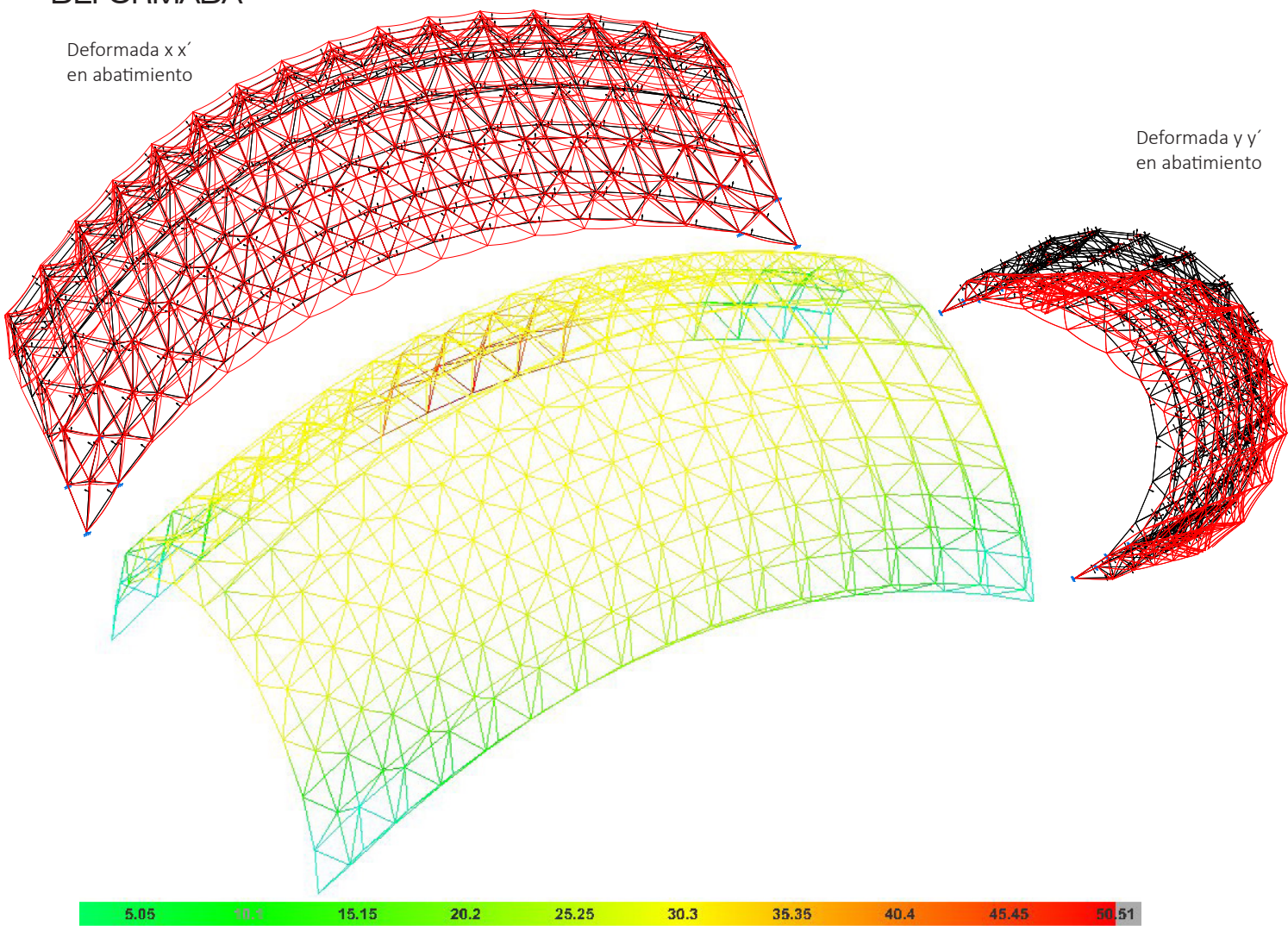


C3.2.3: ESQUEMAS GRÁFICOS DE IDEALIZACIÓN DE LA ESTRUCTURA

-AXILES



-DEFORMADA

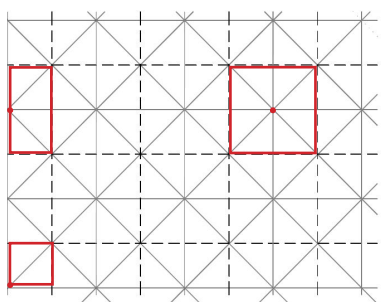


•Figura 108.

C3.3- MALLA VAÍDA DE 5x5

C3.3.1- CÁLCULO DE ESFUERZOS

El siguiente modelo estructural es una malla vaída de doble capa. Está compuesta de semioctaedros con base cuadrada de 5x5m y una distancia hasta el vértice de 2m. De la misma manera que hicimos con las mallas anteriores, lo primero a calcular son las fajas de carga por las que hay que multiplicar las cargas obtenidas en el apartado de estimación de cargas. En este caso se trata de una malla con módulos de 5x5m por lo que sus fajas de carga serán las siguientes:



•Figura 109.

- Nudos centrales: $L_x=L_y= 5,00\text{m}$
- Nudos de borde: $L_x= 2,50\text{m}$ $L_y= 5,00\text{m}$
- Nudos de esquina: $L_x=L_y= 2,50\text{m}$

Estas son las fajas por las que tenemos que multiplicar cada tipo de carga para obtener unas cargas puntuales para aplicar en cada nudo. De manera que las cargas finales que tenemos que aplicar a los nudos son las siguientes:

-Carga permanente: (0,062 kN/m²)

- Nudos centrales: 1,55 kN
- Nudos de borde: 0,78 kN
- Nudos de esquina: 0,39 kN

-Sobrecarga de uso: (0,40 kN/m²)

- Nudos centrales: 10,00 kN
- Nudos de borde: 5,00 kN
- Nudos de esquina: 2,50 kN

-Sobrecarga de nieve: (0,30kN/m²)W

- Nudos centrales: 7,50 kN
- Nudos de borde: 3,75 kN
- Nudos de esquina: 1,87kN

-Sobrecarga de viento: ($q_e=q_b \cdot c_e \cdot c_p$)

Como ya mencionamos anteriormente sabemos que el valor $q_b= 0,52 \text{ kN/m}^2$ pero nos falta por conocer otros valores. El coeficiente de exposición $c_e= 3,63$ al ser 27,65m la altura máxima de cubierta. Como en el Código Técnico no existe ningún anejo destinado al cálculo de viento para cubiertas esféricas utilizaremos la tabla D.12 del DB- SE-AE (cubiertas cilíndricas) para calcular el coeficiente de presión c_p . Aplicando los esquemas resulta una relación de $f/d= 27,65/30= 0,9$ y $g/d= 0$, por lo que tendremos de coeficiente de presión exterior:

- Zona A: 1,00 (presión)
- Zona B: -1,20 (succión)
- Zona C: -0,40 (succión)

Con estos datos se calcula la presión estática q_e , ($q_e= q_b \times c_e \times c_p$), que variará según la zona en la que nos encontremos:

- Zona A: $q_e= 0,52 \times 3,63 \times 1 = 1,89 \text{ kN/m}^2$
- Zona B: $q_e= 0,52 \times 3,63 \times (-1,20) = -2,27 \text{ kN/m}^2$
- Zona C: $q_e= 0,52 \times 3,63 \times (-0,40) = -0,75 \text{ kN/m}^2$

Estos valores son de presión o succión en el exterior. Al tratarse de una construcción diáfana que presenta grandes huecos, la acción de viento genera, además de presiones en el exterior, presiones en el interior, que se suman a las anteriores. Como ya están calculadas en la malla anterior sabemos que tenemos que sumar (-0,50 kN/m²) en la zona B que es la más perjudicada.

Multiplicando estas cargas por sus correspondientes fajas se obtiene como resultado final:

TABLA CARGAS FINALES MALLA VAÍDA 5X5						
CARGAS (kN)	G	Quso	Qnieve	Qviento		
				A	B	C
Centrales	1,55	10,00	7,50	-	-53,00	-
Borde	0,78	5,00	3,75	23,63	-	-8,88
Esquinas	0,39	2,50	1,88	11,81	-	-4,44

•Figura 110.

C3.2.2: DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA

Esta estructura consiste en una malla espacial vaída de doble capa formada por módulos de semioctaedros. Estos semioctaedros tienen una base de 5x5m y una altura de 2m ligados unos a otros formando dos capas iguales pero compensadas entre sí para poder cubrir una superficie total de 30x60m.

Esta estructura está formada por perfiles tubulares de acero laminado S275JR. Se han elegido perfiles tubulares redondos debido a que trabajan muy bien a axil (tracción o compresión) y no necesitan inercia para soportar ningún momento.

Características mecánicas								
Material	Ref.	Descripción	A (cm²)	Avy (cm²)	Avz (cm²)	Iyy (cm4)	Izz (cm4)	It (cm4)
Tipo	Designación							
Acero laminado	S275	1 120x100, (redondos)	34.56	31.20	31.20	527.00	527.00	1054.00
		2 100x10, (redondos)	28.27	25.45	25.45	289.81	289.81	579.62
		3 150x10, (redondos)	43.98	39.58	39.58	1083.06	1083.06	2166.13
		4 150x12.5, (redondos)	54.00	48.60	48.60	1286.63	1286.63	2573.25
		5 200x100, (redondos)	59.69	53.72	53.72	2700.98	2700.98	5401.97
		6 120x12.5, (redondos)	42.22	37.99	37.99	618.06	618.06	1236.11
		7 80x10, (redondos)	21.99	19.79	19.79	137.44	137.44	274.89
		8 100x12.5, (redondos)	34.36	30.93	30.93	335.56	335.56	671.12
		9 90x10, (redondos)	25.13	22.62	22.62	204.20	204.20	408.41
		10 70x10, (redondos)	18.85	16.96	16.96	87.18	87.18	174.36
		11 60x10, (redondos)	15.71	14.14	14.14	51.05	51.05	102.10

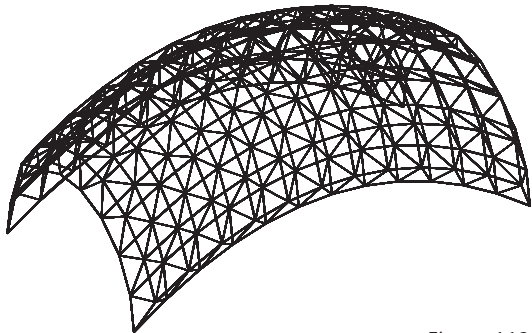
•Figura 111.

En este caso, como la estructura tiene doble curvatura es más estable por sí misma que una malla plana o cilíndrica. Para conseguir su mayor rendimiento estructural se emplean unos diez tipo de perfil. El tipo de perfil más utilizado es un perfil de 100mm de diámetro con un espesor de chapa de 10mm.

Acero laminado: Medición de las superficies			
Serie	Perfil	Longitud (m)	Superficie (m²)
redondos	120x100	890189	335593
	100x10	1417038	445176
	150x10	58049	27355
	150x12.5	20533	9676
	200x100	26608	16718
	120x12.5	68015	25641
	80x10	793620	199458
	100x12.5	61226	19235
	90x10	535642	151449
	70x10	141981	31223
	60x10	179547	33844
Total			1295369

•Figura 112.

En este caso, los perfiles de gran diámetro son los más abundantes por eso a simple vista no se pueden distinguir grandes diferencias de espesores como en los casos anteriores.



•Figura 113.

Estas barras van desde los 80mm de diámetro hasta los 150mm en la parte central de estos cordones.

-Nudos y apoyos:

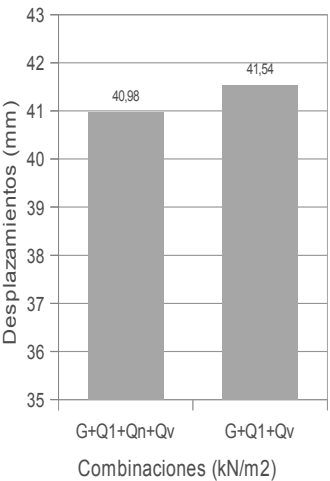
Todos los perfiles de esta estructura están unidos a través de nudos articulados materializados como nudo tipo MERO. De esta manera las barras sólo se transmiten esfuerzo axil pudiendo reducir considerablemente sus diámetros.

Al ser una estructura con forma esférica se opta por apoyarla en los módulos situados en las esquinas. En cada esquina la estructura se apoya en cuatro puntos para repartir lo mejor posible las cargas al terreno y poder reducir el diámetro de los perfilles. De esta manera, la estructura tiene que salvar la longitud más larga de la superficie a cubrir; unos 60m. Aún así, la estructura cumple fácilmente la restricción de un L/500 para una luz de 60m.

-Cargas y deformaciones:

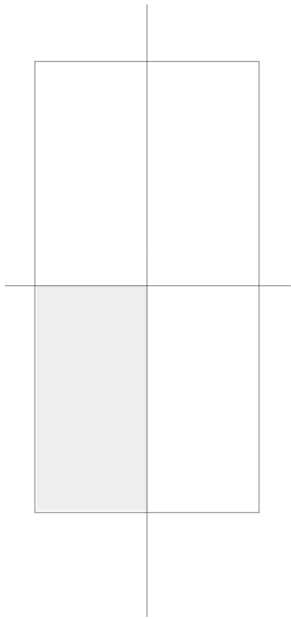
En cuanto a las cargas, se ha decidido colocar las cargas puntuales en cada nudo para simplificar el proceso, entendiend que de una manera más precisa deberían cargarse las barras en la dirección correspondiente y con sus longitudes reales.

Se ha comprobado que la peor combinación para la estructura es la peso propio + uso + viento (succión) ya que la succión producida por el viento es la carga más grande de todas intentando desplazar la estructura hacia arriba. PPero en este tipo de estructura la diferencia de deformación es mínima al tener o no en cuenta la carga variable de nieve.



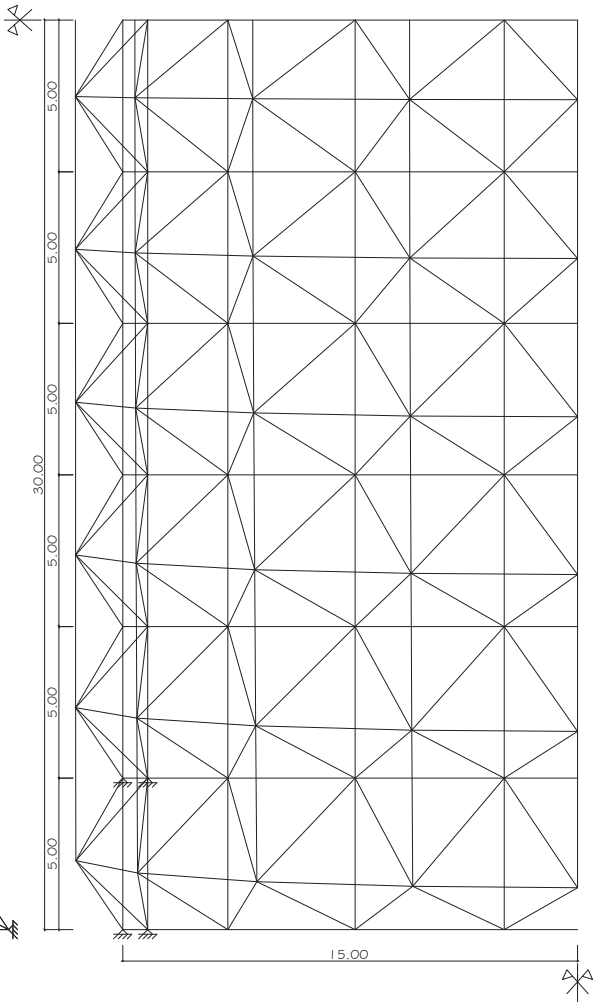
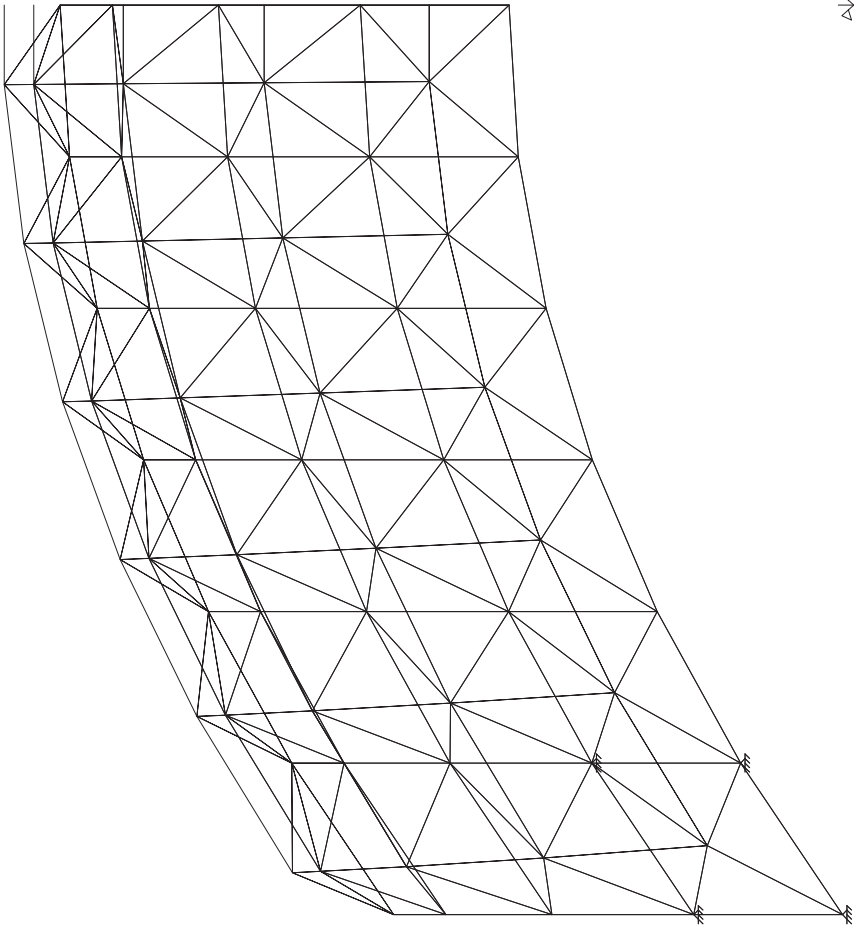
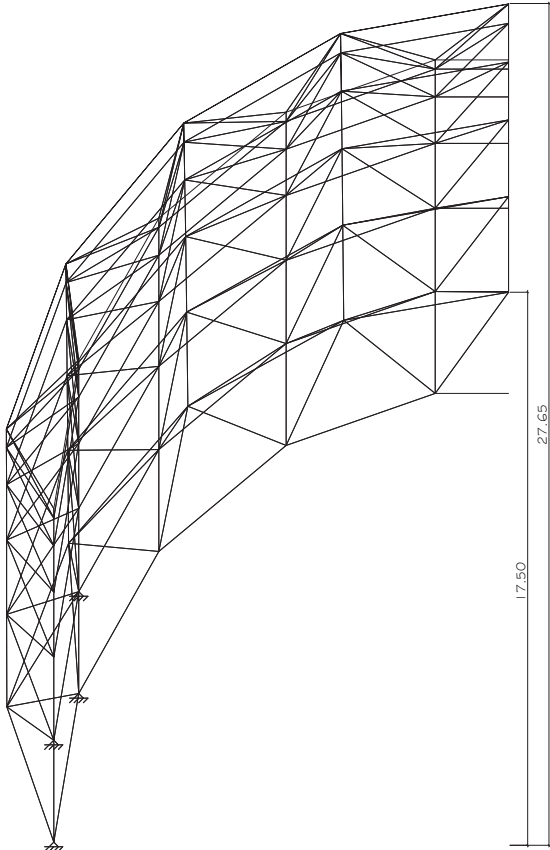
•Figura 114.

C3.2.3: ESQUEMAS GRÁFICOS DE IDEALIZACIÓN DE LA ESTRUCTURA



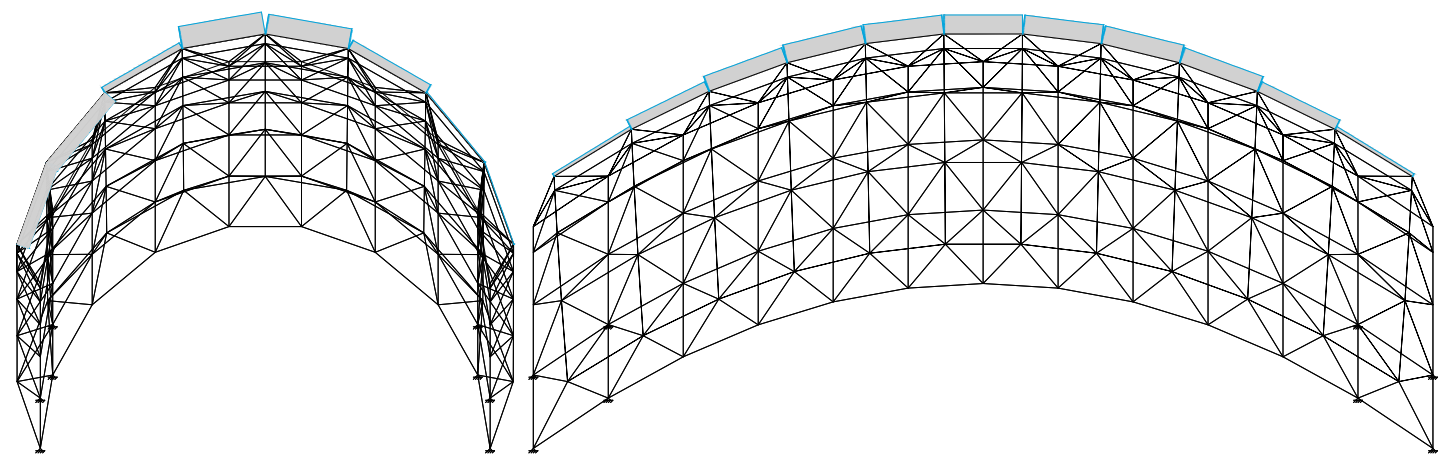
CARACTERISTICAS MALLA VAÍDA 5X5			
Dimensión: 9x12 módulos	Superficie: 30mx60m	Módulo: 5x5m	Canto: 2m
Apoyada en cuatro puntos en cada esquina	Apoyo: articulación		
Deformación	G+Quso+Qnieve+Qviento= 40,18 mm < L/250		
	G+Quso+Qviento= 41,54 mm < L/250		
Peso	51,23 Kg/m²		

•Figura 115.

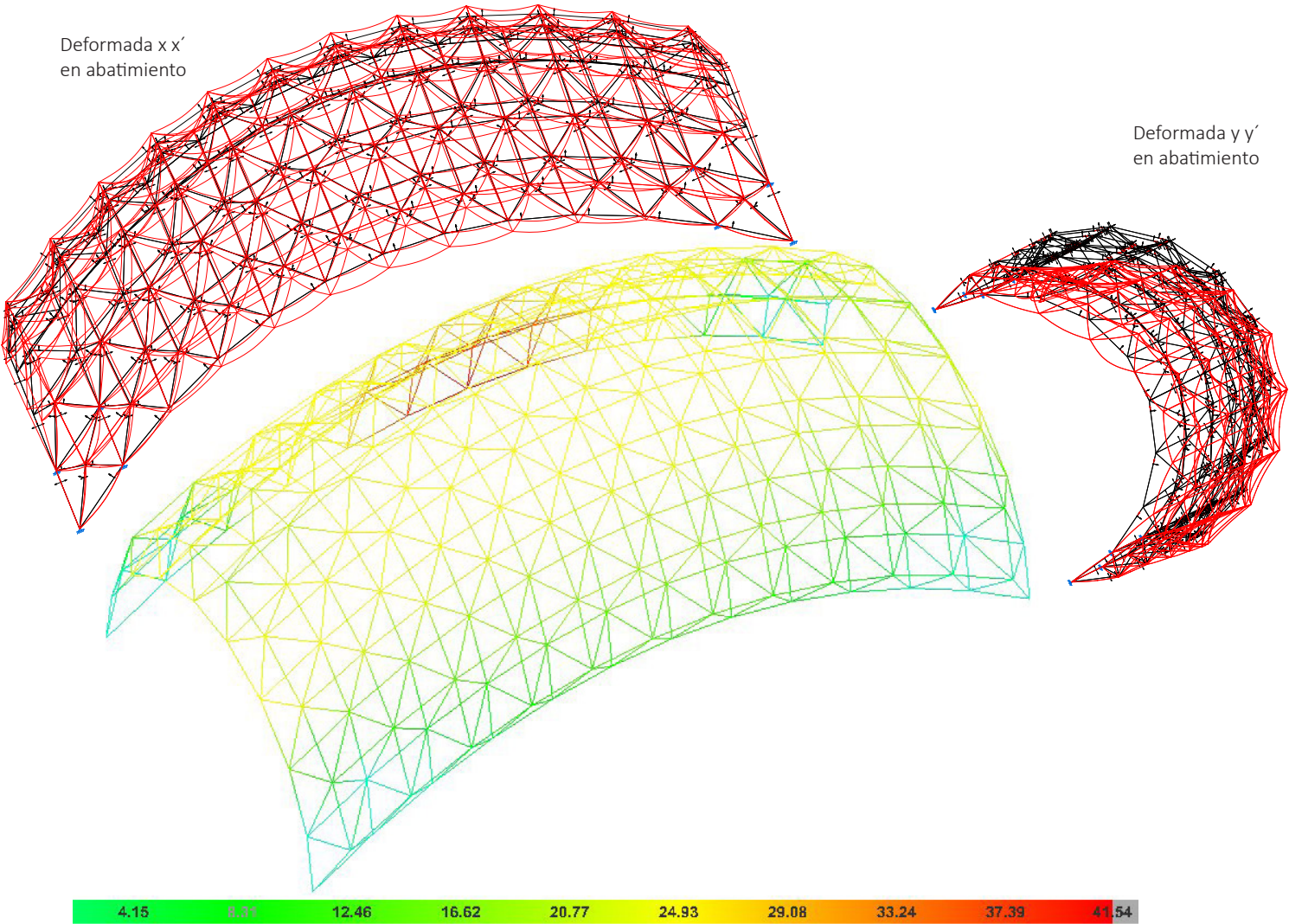


C3.2.3: ESQUEMAS GRÁFICOS DE IDEALIZACIÓN DE LA ESTRUCTURA

-AXILES



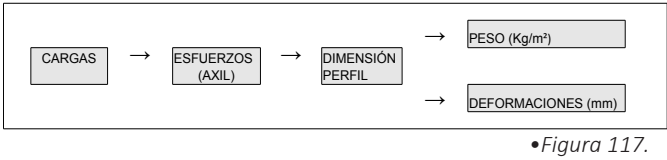
-DEFORMADA



•Figura 116.

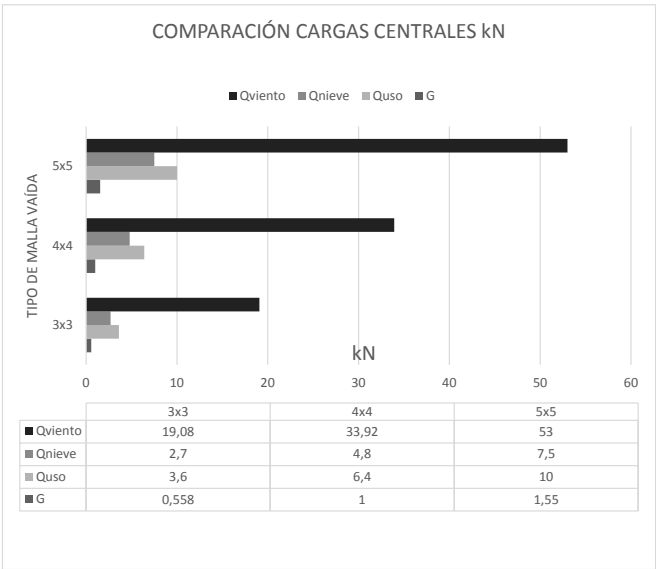
C2.4: COMPARACIÓN ENTRE LAS MALLAS VAÍDAS

Los anteriores análisis sobre los tres tipos de módulos (3x3, 4x4, 5x5) de malla vaída de doble capa se han realizado para poder determinar cuál es la mejor dimensión de la base del módulo semioctaédrico que mejor funciona para cubrir una superficie de 30x60m con una superficie de 1800m². Para ello nos centraremos en los datos obtenidos en los anteriores apartados para poder compararlos y analizarlos intentando llegar a la estructura vaída que mejor responde a esta dimensión de superficie adaptándose a las necesidades que pide un programa deportivo.



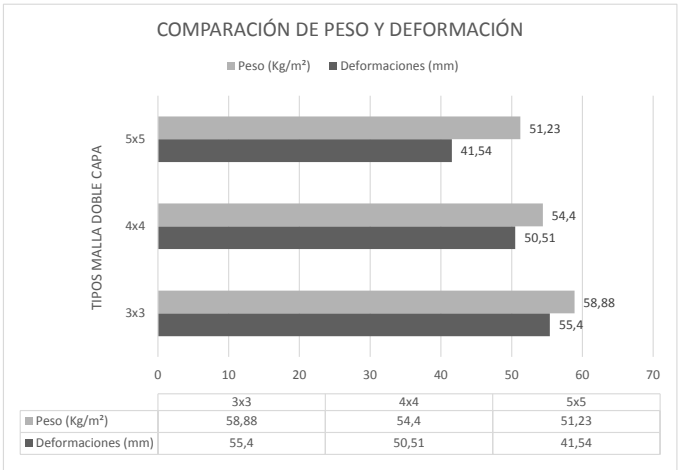
•Figura 117.

Comenzamos este estudio del mismo modo que empezamos cada apartado de cada uno de los tres tipos de estructura; las cargas a aplicar. Como ya observamos, todas las cargas (permanentes o variables) por metro cuadrado son las mismas en las tres estructuras. La diferencia está que al variar la dimensión de la base del semioctaedro cambia la faja de carga por la que hay que multiplicar cada una de las cargas anteriores. De este modo mayor dimensión del módulo mayor faja de carga y por lo tanto mayor carga a aplicar en los nudos.



•Figura 118.

En este gráfico se puede comprobar como aumenta la carga aumentando dimensión del módulo siendo la carga variable de viento la más perjudicada. Todo esto nos lleva a que necesitaremos perfiles de mayor diámetro para soportar cargas mayores. De esta manera, la estructura de módulo 5x5 necesitará mayores perfiles unidos a cumplir la sollicitación de pandeo al hablar de longitudes sobre unos cinco metros. Será el número y tipo de perfil a emplear quienes determinen el peso de la estructura y de alguna manera su deformación (esfuerzos y perfiles). En este caso, la malla vaída de modulación 5x5m es la estructura que menos pesa y que menos deformación sufre por lo cual es la mejor optimizada con respecto a los otros módulos. Esto se debe a que su forma con doble curvatura hace que sea una estructura bastante estable por sí misma de manera que no necesita un gran número de perfiles ni tampoco grandes diámetros (el perfil más utilizado tiene 100mm de diámetro).



•Figura 119.

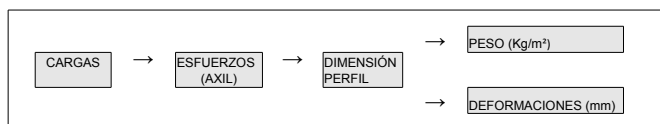
Los datos obtenidos en este análisis justifican las palabras con las que acabé la introducción de este trabajo: “Pero no nos debemos olvidar que el óptimo aprovechamiento de este tipo de estructuras se consigue con un buen diseño estructural. De este modo, la curvatura y forma de la superficie que conforma la malla así como su tipo y número de apoyos son factores claves a la hora de conseguir la mejor optimización.”

C1.4: COMPARACIÓN ENTRE LAS TODAS LAS MALLAS

En este último apartado se van a comparar los módulos que mejor funcionan en cada tipo de estructura obtenidos en las comparaciones anteriores para saber cuál es la mejor forma de cubrir una superficie de 30x60m; plana, cilíndrica o vaída. De este modo las mallas espaciales a comparar son:

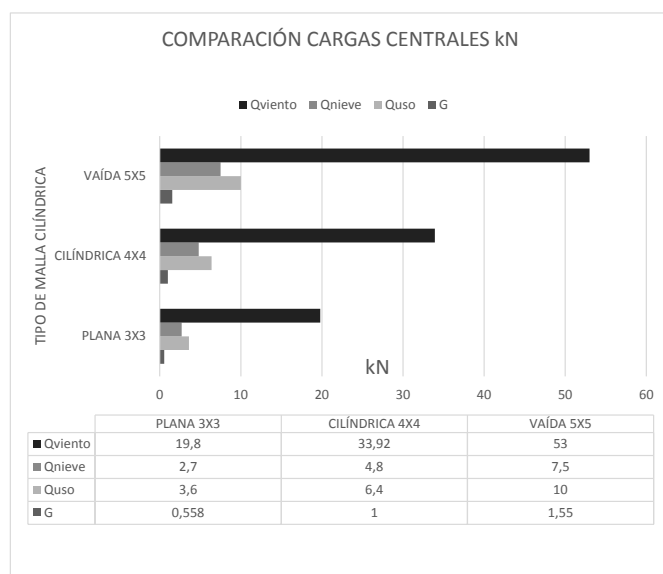
- Malla espacial plana de 3x3m
- Malla espacial cilíndrica de 4x4m
- Malla espacial vaída de 5x5m

Igual que en las comparaciones anteriores, nos centraremos en los datos obtenidos en los anteriores apartados para poder compararlos y analizarnos intentando llegar a la estructura que mejor responda a esta dimensión de superficie adaptándose a las necesidades que necesita un programa deportivo.



•Figura 120.

Comenzamos este estudio del mismo modo que empezamos cada apartado de cada uno de los tres tipos de estructura; las cargas a aplicar. Como ya observamos, todas las cargas (permanentes o variables) por metro cuadrado son las mismas en las tres estructuras. La diferencia está que al variar la dimensión de la base del semioctaedro cambia la faja de carga por la que hay que multiplicar cada una de las cargas anteriores. De este modo mayor dimensión del módulo mayor faja de carga y por lo tanto mayor carga a aplicar en los nudos.

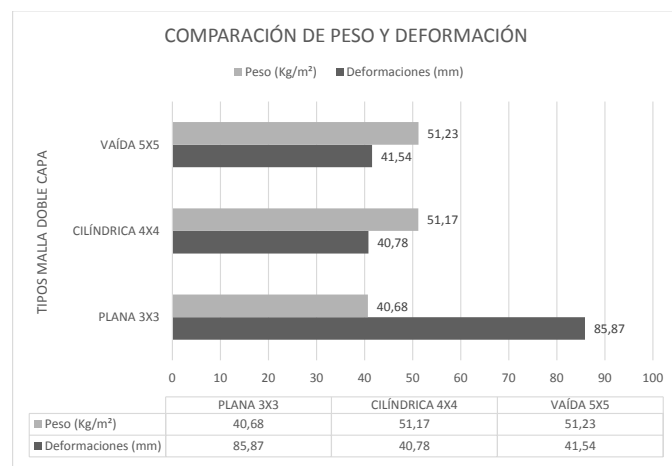


•Figura 121.

En este gráfico se puede comprobar como aumenta la carga aumentando la dimensión del módulo siendo la carga variable de viento la más perjudicada. Todo esto nos lleva a que necesitaremos perfiles de mayor diámetro para soportar cargas mayores. Será el número y tipo de perfil a emplear los que determinen el peso de la estructura y de alguna manera su deformación (esfuerzos y perfiles).

Como se puede observar la malla vaída de 5x5m y la cilíndrica de 4x4m tienen unos pesos y deformaciones muy similares. Pero teniendo en cuenta la limitación funcional y espacial de la malla cilíndrica debido a tener una forma abovedada opto por la malla vaída de 5x5m. Quedando descartada la malla cilíndrica, la siguiente comparación es entre la vaída de 5x5m y la plana de 3x3m.

En cuanto a peso, las dos tienen valores muy similares pero su gran diferencia es la deformación; la malla plana se deforma casi el doble que la malla vaída.



•Figura 122.

Elegir entre dos tipologías diferentes de malla espacial de doble capa es muy complicado. Si su gran diferencia que es la deformación nos ayudase a elegir sería más fácil pero esto no sucede ya que aunque exista una gran diferencia de deformación las dos cumplen sobradamente la restricción de $L/500 = 120\text{mm}$.

En definitiva, me quedaría con la malla vaída de 5x5 porque es más bonita estéticamente sabiendo que la malla plana tiene unos comportamientos estructurales muy parecidos a ella.

E) ÍNDICE FOTOGRÁFICO

- Figura 01. Torre Eiffel, París en 1889; <https://turisteandoporahi.wordpress.com/>
- Figura 02. Forth Railway Bridge de B. Fuller, Edimburgo en 1890; http://www.allposters.es/-sp/Forth-Railway-Bridge-Queensferry-Edinburgh-Lothian-Scotland-United-Kingdom-Posters_i2652932_.htm
- Figura 03. Ford Rotunda de B. Fuller, Michigan en 1953; <https://www.pinterest.com/pin/26599454022016426/>
- Figura 04. Octet truss de B. Fuller, 1959; <https://www.pinterest.com/pin/21884748161617500/>
- Figura 05. Pérez Valcárcel, Juan Bautista; "Mallas espaciales", ETSAC, 2015
- Figura 06. Pérez Valcárcel, Juan Bautista; "Mallas espaciales", ETSAC, 2015
- Figura 07. Villar Monteagudo, Iván; "Introducción en grasshopper", 2015
- Figura 08. Villar Monteagudo, Iván; "Introducción en grasshopper", 2015
- Figura 09. Villar Monteagudo, Iván; "Introducción en grasshopper", 2015
- Figura 10. Villar Monteagudo, Iván; "Introducción en grasshopper", 2015
- Figura 11. Villar Monteagudo, Iván; "Introducción en grasshopper", 2015
- Figura 12. Villar Monteagudo, Iván; "Introducción en grasshopper", 2015
- Figura 13. Villar Monteagudo, Iván; "Introducción en grasshopper", 2015
- Figura 14. Villar Monteagudo, Iván; "Introducción en grasshopper", 2015
- Figura 15. Villar Monteagudo, Iván; "Introducción en grasshopper", 2015
- Figura 16. Villar Monteagudo, Iván; "Introducción en grasshopper", 2015
- Figura 17. Villar Monteagudo, Iván; "Introducción en grasshopper", 2015
- Figura 18. Villar Monteagudo, Iván; "Introducción en grasshopper", 2015
- Figura 19. Villar Monteagudo, Iván; "Introducción en grasshopper", 2015
- Figura 20. Villar Monteagudo, Iván; "Introducción en grasshopper", 2015
- Figura 21. Villar Monteagudo, Iván; "Introducción en grasshopper", 2015
- Figura 22. Villar Monteagudo, Iván; "Introducción en grasshopper", 2015
- Figura 23. Villar Monteagudo, Iván; "Introducción en grasshopper", 2015
- Figura 24. Villar Monteagudo, Iván; "Introducción en grasshopper", 2015
- Figura 25. Villar Monteagudo, Iván; "Introducción en grasshopper", 2015
- Figura 26. Villar Monteagudo, Iván; "Introducción en grasshopper", 2015
- Figura 27. Villar Monteagudo, Iván; "Introducción en grasshopper", 2015
- Figura 28. Villar Monteagudo, Iván; "Introducción en grasshopper", 2015
- Figura 29. Villar Monteagudo, Iván; "Introducción en grasshopper", 2015
- Figura 30. Villar Monteagudo, Iván; "Introducción en grasshopper", 2015
- Figura 31. Pérez Valcárcel, Juan Bautista; "Mallas espaciales", ETSAC, 2015
- Figura 32. Pérez Valcárcel, Juan Bautista; "Mallas espaciales", ETSAC, 2015
- Figura 33. CTE DB-SE-AE; "Tabla 3.4, Acciones en la edificación"
- Figura 34. CTE DB-SE-AE; "Tabla D.10, Acciones en la edificación, marquesina a un agua "
- Figura 35. Villar Monteagudo, Iván; "Tabla de cargas finales de malla plana de 3x3m", 2015
- Figura 36. Villar Monteagudo, Iván; "Características mecánicas de malla plana de 3x3m", 2015
- Figura 37. Villar Monteagudo, Iván; "Medición de superficies de malla plana de 3x3m", 2015
- Figura 38. Villar Monteagudo, Iván; "Axonometría de malla plana de 3x3m", 2015
- Figura 39. Villar Monteagudo, Iván; "Gráfico de deformaciones de malla plana de 3x3m", 2015
- Figura 40. Villar Monteagudo, Iván; "Características finales de malla plana de 3x3m", 2015
- Figura 41. Villar Monteagudo, Iván; "Imagen de deformada de malla plana de 3x3m", 2015
- Figura 42. Pérez Valcárcel, Juan Bautista; "Mallas espaciales", ETSAC, 2015
- Figura 43. Villar Monteagudo, Iván; "Tabla de cargas finales de malla plana de 4x4m", 2015
- Figura 44. Villar Monteagudo, Iván; "Características mecánicas de malla plana de 4x4m", 2015
- Figura 45. Villar Monteagudo, Iván; "Medición de superficies de malla plana de 4x4m", 2015
- Figura 46. Villar Monteagudo, Iván; "Axonometría de malla plana de 4x4m", 2015
- Figura 47. Villar Monteagudo, Iván; "Esquema de apoyos de malla plana de 4x4m", 2015
- Figura 48. Villar Monteagudo, Iván; "Gráfico de deformaciones de malla plana de 4x4m", 2015
- Figura 49. Villar Monteagudo, Iván; "Características finales de malla plana de 4x4m", 2015
- Figura 50. Villar Monteagudo, Iván; "Imagen de deformada de malla plana de 4x4m", 2015

- Figura 51. Pérez Valcárcel, Juan Bautista; “Mallas espaciales”, ETSAC, 2015
- Figura 52. Villar Monteagudo, Iván; “Tabla de cargas finales de malla plana de 5x5m”, 2015
- Figura 53. Villar Monteagudo, Iván; “Características mecánicas de malla plana de 5x5m”, 2015
- Figura 54. Villar Monteagudo, Iván; “Medición de superficies de malla plana de 5x5m”, 2015
- Figura 55. Villar Monteagudo, Iván; “Axonometría de malla plana de 5x5m”, 2015
- Figura 56. Villar Monteagudo, Iván; “Esquema de apoyos de malla plana de 4x4m”, 2015
- Figura 57. Villar Monteagudo, Iván; “Gráfico de deformaciones de malla plana de 5x5m”, 2015
- Figura 58. Villar Monteagudo, Iván; “Características finales de malla plana de 5x5m”, 2015
- Figura 59. Villar Monteagudo, Iván; “Imagen de deformada de malla plana de 5x5m”, 2015
- Figura 60. Villar Monteagudo, Iván; “Esquema de comparación mallas”, 2015
- Figura 61. Villar Monteagudo, Iván; “Gráfico de comparación de cargas”, 2015
- Figura 62. Villar Monteagudo, Iván; “Gráfico de comparación de pesos y deformaciones”, 2015
- Figura 63. Pérez Valcárcel, Juan Bautista; “Mallas espaciales”, ETSAC, 2015
- Figura 64. CTE DB-SE-AE; “Tabla D.12, Acciones en la edificación, superficie cilíndrica”
- Figura 65. Villar Monteagudo, Iván; “Tabla de cargas finales de malla cilíndrica de 3x3m”, 2015
- Figura 66. Villar Monteagudo, Iván; “Características mecánicas de malla cilíndrica de 3x3m”, 2015
- Figura 67. Villar Monteagudo, Iván; “Medición de superficies de malla cilíndrica de 3x3m”, 2015
- Figura 68. Villar Monteagudo, Iván; “Axonometría de malla cilíndrica de 3x3m”, 2015
- Figura 69. Villar Monteagudo, Iván; “Gráfico de deformaciones de malla cilíndrica de 3x3m”, 2015
- Figura 70. Villar Monteagudo, Iván; “Características finales de malla cilíndrica de 3x3m”, 2015
- Figura 71. Villar Monteagudo, Iván; “Imagen de deformada de malla cilíndrica de 3x3m”, 2015
- Figura 72. Pérez Valcárcel, Juan Bautista; “Mallas espaciales”, ETSAC, 2015
- Figura 73. Villar Monteagudo, Iván; “Tabla de cargas finales de malla cilíndrica de 4x4m”, 2015
- Figura 74. Villar Monteagudo, Iván; “Características mecánicas de malla cilíndrica de 4x4m”, 2015
- Figura 75. Villar Monteagudo, Iván; “Medición de superficies de malla cilíndrica de 4x4m”, 2015
- Figura 76. Villar Monteagudo, Iván; “Axonometría de malla cilíndrica de 4x4m”, 2015
- Figura 77. Villar Monteagudo, Iván; “Gráfico de deformaciones de malla cilíndrica de 4x4m”, 2015
- Figura 78. Villar Monteagudo, Iván; “Características finales de malla cilíndrica de 4x4m”, 2015
- Figura 79. Villar Monteagudo, Iván; “Imagen de deformada de malla cilíndrica de 4x4m”, 2015
- Figura 80. Pérez Valcárcel, Juan Bautista; “Mallas espaciales”, ETSAC, 2015
- Figura 81. Villar Monteagudo, Iván; “Tabla de cargas finales de malla cilíndrica de 5x5m”, 2015
- Figura 82. Villar Monteagudo, Iván; “Características mecánicas de malla cilíndrica de 5x5m”, 2015
- Figura 83. Villar Monteagudo, Iván; “Medición de superficies de malla cilíndrica de 5x5m”, 2015
- Figura 84. Villar Monteagudo, Iván; “Axonometría de malla cilíndrica de 5x5m”, 2015
- Figura 85. Villar Monteagudo, Iván; “Gráfico de deformaciones de malla cilíndrica de 5x5m”, 2015
- Figura 86. Villar Monteagudo, Iván; “Características finales de malla cilíndrica de 5x5m”, 2015
- Figura 87. Villar Monteagudo, Iván; “Imagen de deformada de malla cilíndrica de 5x5m”, 2015
- Figura 88. Villar Monteagudo, Iván; “Esquema de comparación mallas”, 2015
- Figura 89. Villar Monteagudo, Iván; “Gráfico de comparación de cargas”, 2015
- Figura 90. Villar Monteagudo, Iván; “Gráfico de comparación de pesos y deformaciones”, 2015
- Figura 91. Pérez Valcárcel, Juan Bautista; “Mallas espaciales”, ETSAC, 2015
- Figura 92. CTE DB-SE-AE; “Tabla D.12, Acciones en la edificación, superficie cilíndrica”
- Figura 93. CTE DB-SE-AE; “Tabla 3.6, Acciones en la edificación, coeficientes de presión”
- Figura 94. Villar Monteagudo, Iván; “Tabla de cargas finales de malla vaída de 3x3m”, 2015
- Figura 95. Villar Monteagudo, Iván; “Características mecánicas de malla vaída de 3x3m”, 2015
- Figura 96. Villar Monteagudo, Iván; “Medición de superficies de malla vaída de 3x3m”, 2015
- Figura 97. Villar Monteagudo, Iván; “Axonometría de malla vaída de 3x3m”, 2015
- Figura 98. Villar Monteagudo, Iván; “Gráfico de deformaciones de malla vaída de 3x3m”, 2015
- Figura 99. Villar Monteagudo, Iván; “Características finales de malla vaída de 3x3m”, 2015
- Figura 100. Villar Monteagudo, Iván; “Imagen de deformada de malla cilíndrica de 3x3m”, 2015
- Figura 101. Pérez Valcárcel, Juan Bautista; “Mallas espaciales”, ETSAC, 2015
- Figura 102. Villar Monteagudo, Iván; “Tabla de cargas finales de malla vaída de 4x4m”, 2015

- Figura 103. Villar Monteagudo, Iván; "Características mecánicas de malla vaída de 4x4m", 2015
- Figura 104. Villar Monteagudo, Iván; "Medición de superficies de malla vaída de 4x4m", 2015
- Figura 105. Villar Monteagudo, Iván; "Axonometría de malla vaída de 4x4m", 2015
- Figura 106. Villar Monteagudo, Iván; "Gráfico de deformaciones de malla vaída de 4x4m", 2015
- Figura 107. Villar Monteagudo, Iván; "Características finales de malla vaída de 4x4m", 2015
- Figura 108. Villar Monteagudo, Iván; "Imagen de deformada de malla vaída de 4x4m", 2015
- Figura 109. Pérez Valcárcel, Juan Bautista; "Mallas espaciales", ETSAC, 2015
- Figura 110. Villar Monteagudo, Iván; "Tabla de cargas finales de malla vaída de 5x5m", 2015
- Figura 111. Villar Monteagudo, Iván; "Características mecánicas de malla vaída de 5x5m", 2015
- Figura 112. Villar Monteagudo, Iván; "Medición de superficies de malla vaída de 5x5m", 2015
- Figura 113. Villar Monteagudo, Iván; "Axonometría de malla vaída de 5x5m", 2015
- Figura 114. Villar Monteagudo, Iván; "Gráfico de deformaciones de malla vaída de 5x5m", 2015
- Figura 115. Villar Monteagudo, Iván; "Características finales de malla vaída de 5x5m", 2015
- Figura 116. Villar Monteagudo, Iván; "Imagen de deformada de malla vaída de 5x5m", 2015
- Figura 117. Villar Monteagudo, Iván; "Esquema de comparación mallas", 2015
- Figura 118. Villar Monteagudo, Iván; "Gráfico de comparación de cargas", 2015
- Figura 119. Villar Monteagudo, Iván; "Gráfico de comparación de pesos y deformaciones", 2015
- Figura 120. Villar Monteagudo, Iván; "Esquema de comparación de todas mallas", 2015
- Figura 121. Villar Monteagudo, Iván; "Gráfico de comparación de cargas", 2015
- Figura 122. Villar Monteagudo, Iván; "Gráfico de comparación de pesos y deformaciones", 2015

LIBROS

- Engel, Heino; "Sistemas de estructuras", Editorial Gustavo Gili, 2001
- Muñiz Gómez, Sanitago; "Mallas espaciales", Publicación de Universidade de A Coruña, 1993
- Pérez Valcárcel, J. B. y Estévez Cimadevila, Javier; "Mallas espaciales. Matricial: manual del usuario", Departamento de tecnología de la construcción, Universidad de a Coruña, 1ª edición 1985.
- Buxadé, Carle y Margarit, juan; "Las mallas espaciales en arquitectura", Barcelona : GG, D.L. 1972
- Donato, Dario; "Contaminazioni creative digitali: trascrizioni di una complessità algoritmica attraverso Rhino, Grasshopper : volume 1.0", [Italia]: lulu.com, cop.2012

TESIS

- Vázquez Rodríguez, José Antonio; "Las barras huecas de madera en la construcción de estructuras espaciales", A Coruña, 2001
- Estévez Cimadevila, Javier; "Análisis no lineal de mallas espaciales de doble capa con dimensionado estricto", A Coruña, 1990
- Pérez Valcárcel, J. B. y Escrig Pallares, Félix; "Estructuras espaciales: entre la imaginación y la crisis", Universidade da Coruña, 1993